

CARACTERIZAÇÃO À FRATURA DE UM MATERIAL COMPÓSITO COM CARBONO-EPÓXIDO E CORTIÇA

Romina Lopes Fernandes

Dissertação do MIEM

Orientador: Prof. Marcelo Francisco de Sousa Ferreira de Moura



Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia

FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Porto, Julho de 2013

RESUMO

Nos últimos anos tem-se verificado um interesse crescente na utilização de materiais compósitos em aplicações de engenharia com necessidades de elevada resistência e reduzido peso. Estes materiais alargam substancialmente o leque de opções que se colocam aos projetistas e engenheiros de materiais. Outro material que merece a atenção dos projetistas de estruturas é a cortiça. De facto, as suas boas características de isolamento térmico e acústico, baixo peso, aliadas aos aspetos económicos e ecológicos, tornam a cortiça um material muito interessante.

Na presente dissertação é produzido e caracterizado à fratura um material compósito constituído por cortiça e por lâminas unidireccionais de carbono/epóxico (C-E). Mais especificamente é caracterizado o seu comportamento à fratura para solicitações em modo I e em modo II, através da realização de ensaios *Double Cantilever Beam* (DCB) e *End-Notched Flexure* (ENF). Foi utilizado um método baseado no conceito de fenda equivalente, na flexibilidade do provete e na teoria de vigas (*Compliance Based Beam Method* (CBBM)) para obter as curvas-R em modo I e em modo II, ($G_{I,II} = f(a_{eq})$), respetivamente. O procedimento foi validado numericamente, recorrendo ao *software* ABAQUS® e usando um modelo coesivo. Para isso, os valores de G_{Ic} e de G_{IIc} foram determinados experimentalmente usando o CBBM. Estes valores foram subsequentemente usados no modelo numérico com o objetivo de comparar as respetivas curvas $P-\delta$ e curvas-R numéricas com as experimentais. Observou-se uma excelente convergência entre os resultados numéricos e experimentais, o que valida o procedimento proposto.

Por fim, comparando os resultados com os obtidos noutros trabalhos relativos a provetes constituídos apenas por C-E, chegou-se à conclusão que a introdução da cortiça provocou um aumento da tenacidade interlaminar em modo I. No que respeita ao modo II, o comportamento à fratura observado alterou-se de forma marcante relativamente ao que caracteriza o C-E. Na verdade, foi observado um aumento contínuo da energia associada à fratura durante a propagação, para o qual contribuiu o efeito de atrito entre as faces das superfícies fraturadas e/ou o efeito compressivo espúrio do apoio central.

Fracture Characterization of a Composite Material based on Carbon-Epoxy and Cork

ABSTRACT

In the last years the application of composite materials in engineering structures requiring high strength and low weight has increased. These materials give to the designers and materials engineers' a wide range of options. Other material that deserves the attention of the structures designers' is the cork. In fact, their excellent properties of thermal and acoustic insulation, low weight, combined with economic and ecological aspects, make the cork a very interesting material.

In this thesis, a composite material consisting of cork and unidirectional layers of carbon-epoxy (C-E) is produced and characterized to fracture. More specifically, the fracture behavior under mode I and mode II was performed by means of the Double Cantilever Beam (DCB) and End-Notched Flexure (ENF) tests. An equivalent crack procedure based on specimen compliance and beam theory (Compliance Based Beam Method (CBBM)) was used to obtain the R-curves in mode I and mode II ($G_{I,II} = f(a_{eq})$), respectively. The procedure was numerically validated using the ABAQUS® software and a cohesive zone modeling. For this, the G_{Ic} and G_{IIc} values were experimentally determined using the CBBM. These values were subsequently used in numerical simulations with the aim of comparing the respective load-displacement and R-curves with the experimental ones. There was an excellent agreement between the numerical and experimental results, which validates the proposed procedure.

Comparing the results with others obtained in another works relative to C-E specimens, it was concluded that the introduction of cork induced an increase of interlaminar toughness in mode I. Regarding mode II, the fracture behavior remarkable changed relatively to that which characterizes C-E. In fact, a continuous increase of energy associated with fracture during propagation was observed which was attributed to friction effects between the faces of fractured surfaces and/or spurious compressive effects of the central loading point.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Marcelo Moura, orientador da presente dissertação, pela sua dedicação, disponibilidade e incentivo que apresentou durante o tempo de realização deste trabalho. A sua ajuda foi imprescindível para a conclusão deste trabalho.

Ao Engenheiro Filipe Silva pela sua disponibilidade e dedicação na realização da parte experimental, bem como na ajuda com todo o *software* necessário para a validação dos métodos experimentais.

À Engenheira Célia Novo pela disponibilidade e flexibilidade das instalações do INEGI. Ao Fábio e ao João Pedro por toda a ajuda prestada durante a parte experimental. À Andreia Durães pela disponibilidade e ajuda prestada nos ensaios experimentais.

Finalmente, aos meus Pais, às minhas Irmãs e aos meus amigos que me acompanharam ao longo de todo o curso.

ÍNDICE

1	Introdução.....	1
1.1	Contextualização do Trabalho	1
1.2	Objetivos do Trabalho	2
1.3	Motivos da Utilização da Cortiça	2
1.4	Resumo dos Capítulos	2
2	Revisão Bibliográfica.....	5
2.1	Introdução aos Materiais Compósitos	5
2.2	Estruturas <i>Sandwich</i>	7
2.3	Laminados de Fibras de Carbono	9
2.4	Cortiça.....	9
2.4.1	Estrutura Macroscópica	11
2.4.2	Estrutura Microscópica.....	12
2.4.3	Composição Química.....	14
2.4.4	Propriedades Físicas	14
2.4.5	Comportamento da Cortiça à Compressão	15
2.4.6	Comportamento da Cortiça à Tração	18
2.4.7	Mecanismos de fratura da cortiça	19
2.4.8	Comparação com Outros Materiais Espumosos	20
2.4.9	Aglomerados de Cortiça	21
2.5	Aplicação da Mecânica da Fratura aos Compósitos	23
2.6	Investigação Recente na Área da Cortiça	24
3	Metodologia Utilizada.....	27
3.1	Ensaio <i>Double Cantilever Beam</i>	27
3.1.1	Determinação da Energia de Fratura (G_I).....	29

3.2	Ensaio <i>End Notched Flexure</i>	34
3.2.1	Determinação da Energia de Fratura (G_{II})	35
4	Procedimento Experimental	39
4.1	Materiais	39
4.2	Produção das Placas.....	40
4.3	Geometria e Produção dos Provetes	43
4.3.1	Colagem dos Suportes para o Ensaio DCB	45
4.3.2	Medição dos Provetes	45
4.3.3	Ensaaios dos Provetes.....	47
5	Resultados Experimentais	49
5.1	Placa 1.....	49
5.2	Placa 2.....	51
5.2.1	Ensaaios DCB.....	51
5.2.1.1	Curvas Força-Deslocamento	51
5.2.1.2	Curvas de Resistência.....	54
5.2.2	Ensaaios ENF	57
5.2.2.1	Curvas Força-Deslocamento	57
5.2.2.2	Curvas de Resistência.....	60
5.2.3	Análise das Superfícies de Fratura	62
6	Análise Numérica.....	65
6.1	Validação do Método.....	67
6.2	Ensaaios DCB.....	68
6.3	Ensaaios ENF	71
7	Conclusões	73
8	Perspetivas para Trabalhos Futuros	75
9	Referências Bibliográficas	77

10	Anexo	81
----	-------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Espuma de Poliuretano [9].....	7
Figura 2.2 - Estrutura do núcleo em ninho de abelha de alumínio [10].	8
Figura 2.3 – Tipos de falha de adesivos. Adaptado de [9].	8
Figura 2.4 – Descortiçamento [13].....	10
Figura 2.5 – Representação esquemática da cortiça [11].	10
Figura 2.6 – Representação de um elemento de volume da casca do sobreiro e respetiva nomenclatura das direções e secções [8].	11
Figura 2.7 - Micrografia SEM da secção tangencial da cortiça natural (após tratamento) [12].	12
Figura 2.8 – Modelo da estrutura da parede celular da cortiça proposto por von Hohnel [14].	13
Figura 2.9 – Modelo de “meia-parede” celular da cortiça proposto por Sitte: M – lamela média, P – parede primária, C – ceras, Sb – suberina, S – parede secundária, T – parede terciária, P _o - canalículos [14].	13
Figura 2.10 – Representação esquemática da curva de compressão de um material celular [14].....	16
Figura 2.11 – Curvas de compressão experimentais da cortiça cozida (R-compressão radial; NR – compressão não-radial) [14].	16
Figura 2.12 – Curvas $\sigma(\epsilon)$ de tração da cortiça segundo as três direções principais (R-radial; T-tangencial; A-axial) [14].....	18
Figura 2.13 – Representação esquemática dos mecanismos de fratura da cortiça. a) fratura transversal das paredes; b) e c) fratura ao longo das paredes [14].....	20
Figura 2.14 – Mapa de seleção de materiais comparando a resistência à compressão específica (σ/ρ) com o módulo de Young específico (E/ρ) [12].....	21
Figura 2.15 – Mapa de seleção de materiais comparando a condutividade térmica com a resistência à compressão (σ) [12].	21

Figura 2.16 – Aglomerado de cortiça usado no trabalho experimental – CoreCork NL20.	22
Figura 2.17 – Curva de compressão do aglomerado NL20 [18].	23
Figura 2.18 – Modos de propagação de uma fenda [20].	24
Figura 3.1 – Esquema dos provetes de C-E e cortiça.	27
Figura 3.2 – Esquema do ensaio DCB [28].	28
Figura 3.3 - Esquema dos provetes DCB.	29
Figura 3.4 – Detalhe do braço superior do provete.	29
Figura 3.5 – Tensões a atuar num elemento de viga composta (em altura) por diferentes materiais [30].	30
Figura 3.6 – Representação do braço superior do provete DCB.	31
Figura 3.7 - Perfil das tensões de corte ao longo da espessura do braço superior do provete entre $0 \leq x \leq a$.	32
Figura 3.8 – Representação esquemática da ZPF e do conceito de fenda equivalente [27].	33
Figura 3.9 – Representação esquemática da obtenção do fator de correção do comprimento de fenda inicial.	33
Figura 3.10 – Geometria do provete ENF [28].	34
Figura 3.11 – Representação do provete DCB entre $a \leq x \leq 2L$.	36
Figura 3.12 – Perfil das tensões de corte ao longo da espessura do provete $a \leq x \leq 2L$.	37
Figura 4.1 – Etapas do processo de produção das placas: a) corte da folha de cortiça, b) corte do carbono-epóxico, c) empilhamento das camadas de carbono-epóxico	41
Figura 4.2 – Colocação do filme de Teflon.	42
Figura 4.3 - Esquema da disposição do teflon nas placas produzidas.	42
Figura 4.4 – Empilhamento final com filme desmoldante.	42
Figura 4.5 – Ciclo de cura do carbono-epóxico.	43
Figura 4.6 – Placa 1 após cura.	43

Figura 4.7 – Representação esquemática dos ensaios experimentais: a) DCB; b) ENF [19].	44
Figura 4.8 – Provetes resultantes da placa 1.....	44
Figura 4.9 – Pormenor da marcação lateral dos provetes.....	45
Figura 4.10 – Pormenor da fixação das dobradiças durante o período de cura do adesivo.	45
Figura 4.11 – Aspeto geral de um ensaio DCB.	47
Figura 4.12 – Aspeto geral de um ensaio ENF.....	47
Figura 5.1 – Provete DCB referente à placa 1.....	49
Figura 5.2 – Provete DCB2 durante o ensaio.	50
Figura 5.3 – Pormenor do dano local ocorrido na face superior no provete DCB2.	50
Figura 5.4 – Pormenor do dano na face superior (à compressão) no provete ENF7.....	50
Figura 5.5 – Provete DCB referente à placa 2.....	51
Figura 5.6 – Curvas P - δ dos provetes DCB.	52
Figura 5.7 – Propagação da fenda durante o ensaio DCB do provete 8.	53
Figura 5.8 – Detalhe da zona de propagação da fenda no provete DCB8 – rotura coesiva pela cortiça.....	53
Figura 5.9 – Zona de propagação da fenda no provete DCB2 – rotura coesiva pela cortiça.	53
Figura 5.10 - Curva P - δ experimental e a respetiva curva-R do provete DCB2.....	54
Figura 5.11 - Curva P - δ experimental e a respetiva curva-R do provete DCB3.....	54
Figura 5.12 - Curva P - δ experimental e a respetiva curva-R do provete DCB4.....	54
Figura 5.13 - Curva P - δ experimental e a respetiva curva-R do provete DCB5.....	55
Figura 5.14 - Curva P - δ experimental e a respetiva curva-R do provete DCB6.....	55
Figura 5.15 - Curva P - δ experimental e a respetiva curva-R do provete DCB7.....	55
Figura 5.16 - Curva P - δ experimental e a respetiva curva-R do provete DCB8.....	55

Figura 5.17 – Curvas $P-\delta$ dos provetes ENF1, ENF2, ENF3 e ENF4 ($a_0 = 102\text{mm}$, $2L = 280\text{mm}$).	57
Figura 5.18 - Curvas $P-\delta$ dos provetes ENF5 e ENF6 ($a_0 = 50\text{mm}$, $2L = 200\text{mm}$).	58
Figura 5.19 - Curvas $P-\delta$ dos provetes ENF7 e ENF8 ($a_0 = 40\text{mm}$, $2L = 200\text{mm}$).	58
Figura 5.20 – Provede ENF2 durante o ensaio – propagação da fenda já é visível.	59
Figura 5.21 – Provede ENF5 durante o ensaio.	59
Figura 5.22 – Detalhe da zona de propagação da fenda – provede ENF5.	60
Figura 5.23 - Curva $P-\delta$ experimental e a respetiva curva-R do provede ENF7.	60
Figura 5.24 - Curva $P-\delta$ experimental e a respetiva curva-R do provede ENF8.	61
Figura 5.25 – Superfícies de fratura do provede DCB2.	62
Figura 5.26 - Superfícies de fratura do Provede ENF1.	63
Figura 5.27 - Superfícies de fratura do Provede ENF8.	63
Figura 6.1 – Modelo de dano em modo puro e em modo misto (I+II) [34].	65
Figura 6.2 – Malha de elementos finitos.	66
Figura 6.3 – Detalhe da malha do provede DCB ilustrando as condições de fronteira... ..	66
Figura 6.4 – Provede ENF ilustrando as condições de fronteira.	66
Figura 6.5 – Curva $P-\delta$ numérica e a respetiva curva-R - DCB.	67
Figura 6.6 - Curva $P-\delta$ numérica e a respetiva curva-R - ENF.	67
Figura 6.7 - Comparação entre as curvas $P-\delta$ numérica e experimental e respetivas curvas-R para o provede DCB2.	68
Figura 6.8 - Comparação entre as curvas $P-\delta$ numérica e experimental e respetivas curvas-R para o provede DCB3.	68
Figura 6.9 - Comparação entre as curvas $P-\delta$ numérica e experimental e respetivas curvas-R para o provede DCB4.	68
Figura 6.10 - Comparação entre as curvas $P-\delta$ numérica e experimental e respetivas curvas-R para o provede DCB5.	69

Figura 6.11 - Comparação entre as curvas P - δ numérica e experimental e respectivas curvas-R para o provete DCB6.....	69
Figura 6.12 - Comparação entre as curvas P - δ numérica e experimental e respectivas curvas-R para o provete DCB7.....	69
Figura 6.13 - Comparação entre as curvas P - δ numérica e experimental e respectivas curvas-R para o provete DCB8.....	69
Figura 6.14 - Comparação entre as curvas P - δ numérica e experimental e respectivas curvas-R para o provete ENF7.	71
Figura 6.15 - Comparação entre as curvas P - δ numérica e experimental e respectivas curvas-R para o provete ENF8.	71

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Constituição química da cortiça [11].	14
Tabela 2.2 – Propriedades gerais da cortiça.	15
Tabela 2.3 – Propriedades Mecânicas da Cortiça (R-direção radial; NR-direções não radiais).	19
Tabela 4.1 – Propriedades elásticas de uma lâmina do pré-impregnado [26].	39
Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas do CoreCork NL20. Adaptado de [31].	40
Tabela 4.3 – Propriedades mecânicas do CoreCork NL20, numa estrutura sandwich com fibra de vidro. Adaptado de [31].	40
Tabela 4.4 – Espessura das placas produzidas antes da prensagem	41
Tabela 4.5 – Dimensões médias de cada provete.	46
Tabela 5.1 – Valores médios da energia crítica de fratura em modo I dos provetes DCB.	56
Tabela 5.2 – Valores da energia crítica de fratura em modo II dos provetes ENF7 e ENF8.	61
Tabela 6.1 – Valores dos parâmetros usados nas simulações.	70
Tabela 6.2 – Comparação entre os valores experimentais e numéricos de G_{Ic}	71
Tabela 6.3 – Valores dos parâmetros usados nas simulações.	72

NOMENCLATURA

Abreviaturas

DCB	<i>Double Cantilever Beam</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
CBBM	<i>Compliance Based Beam Method</i>
CCM	<i>Compliance Calibration Method</i>
CBT	<i>Corrected Beam Theory</i>
C-E	Carbono/Epóxico
ZPF	Zona de Processo de Fratura
COV	<i>Coefficient of Variation</i>
Curva-R	Curva de Resistência ($G_C = f(a_{eq})$)
Curva $P-\delta$	Curvas de Força-Deslocamento
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
INEGI	Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
PU	Poliuretano
PE	Polietileno

Simbologia

G_{ic}	Taxa crítica de libertação de energia de fratura em modo i ($i=I,II$)
R	Direção radial
NR	Direção não-radial (tangencial ou axial)
a_0	Comprimento de fenda inicial
$P_{máx}$	Força máxima registada numa curva $P-\delta$
E_R	Módulo de Young na direção radial

E_{NR}	Módulo de Young na direção não-radial
$2L$	Comprimento entre apoios dos provetes ENF
B	Largura dos provetes
V	Esforço transversal
P	Força
a	Comprimento de fenda
C	Flexibilidade
h_l	Espessura de cada laminado de C-E
$2h_c$	Espessura da folha de cortiça
U_f	Energia de deformação elástica devido aos efeitos da flexão
U_{corte}	Energia de deformação elástica devido aos efeitos de corte
M_f	Momento fletor
D_m	Rigidez equivalente à flexão de cada braço do provete
D_{mT}	Rigidez equivalente à flexão da secção total do provete
E_c	Módulo de Young da cortiça
E_l	Módulo de Young do laminado de carbono
d_c	Distância entre o eixo neutro da cortiça e o eixo neutro do braço superior do provete
d_l	Distância entre o eixo neutro do laminado de carbono e o eixo neutro do braço superior do provete
$G_{xy(c)}$	Módulo de corte da cortiça
$G_{xy(l)}$	Módulo de corte do laminado de carbono
a_{eq}	Comprimento de fenda equivalente

$C_{C(0 \rightarrow a)}$	Flexibilidade devida ao corte entre $0 \leq x \leq a$
$C_{C(a \rightarrow 2L)}$	Flexibilidade devida ao corte entre $a \leq x \leq 2L$
C_1, C_2	Constantes
δ	Deslocamento
τ_{l_s}	Tensões de corte no laminado superior entre $0 \leq x \leq a$
τ_{l_i}	Tensões de corte no laminado intermédio entre $0 \leq x \leq a$
τ_c	Tensões de corte na cortiça
τ_l	Tensões de corte no laminado entre $a \leq x \leq 2L$
Δ	Fator de correção do comprimento de fenda inicial a_0
α, β	Coeficientes

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

Os materiais compósitos alargam substancialmente o leque de opções que se colocam aos projetistas e engenheiros de materiais. Assim, estes materiais encontram-se disseminados por diferentes áreas de atividade, que incluem indústrias de grande exigência e visibilidade tecnológica, como é o caso da indústria de transportes e da construção civil. Outro material que merece a atenção dos projetistas de estruturas é a cortiça. De facto, as suas boas características de isolamento térmico e acústico, baixo peso, aliadas aos aspetos económicos e ecológicos, tornam a cortiça um material muito interessante. Neste contexto, surgem os aglomerados de cortiça (folhas de cortiça, de espessura reduzida), que são muito utilizados na indústria como revestimento de superfícies.

Neste trabalho pretende-se produzir e caracterizar à fratura um material compósito constituído por cortiça e por lâminas unidireccionais de carbono/epóxico (C-E), recorrendo a um processo de co-cura. A ideia consiste em produzir uma solução construtiva compacta, capaz de tirar partido das boas propriedades mecânicas do C-E, nomeadamente da sua rigidez e resistência específicas, e da baixa rigidez da cortiça, o que previsivelmente tornará o material resultante mais tolerante ao dano. Adicionalmente, o custo do material compósito será inferior ao C-E monolítico, na medida em que o preço do aglomerado de cortiça é substancialmente inferior

ao do C-E. A caracterização à fratura permitirá avaliar o comportamento do material resultante na presença de fendas, bem como as características de adesão entre ambos os materiais constituintes.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho visa o estudo experimental de um novo material compósito. Mais especificamente pretende-se caracterizar o seu comportamento à fratura em modo I e em modo II. Partindo disto, será possível comparar os resultados obtidos com os obtidos noutros trabalhos em que consideram apenas o C-E. Assim, poder-se-á tirar conclusões acerca da eventual influência benéfica da cortiça na resistência interlaminar destes laminados que, como é sabido, constitui um dos aspetos críticos do seu comportamento mecânico.

1.3 MOTIVOS DA UTILIZAÇÃO DA CORTIÇA

A motivação para a utilização da cortiça está relacionada com o facto de esta ser um material que apresenta uma série de propriedades peculiares e que tem um baixo custo. Para além disso, é um material natural, renovável e reciclável, o que é extremamente importante nos dias de hoje, devido aos problemas ambientais existentes. Por outro lado, a cortiça é um produto nacional, e como tal deve ser valorizada. Tem uma posição de destaque na economia portuguesa, tanto a nível da produção como na transformação industrial. Para além do alargado leque de utilizações, tem uma conotação ecológica, não só por ser uma matéria-prima, mas também pelo ecossistema que a envolve, do sobreiro ao montado de sobro e toda a fauna e flora que lhe está associada.

1.4 RESUMO DOS CAPÍTULOS

A presente dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma:

- no capítulo 2 é feita uma pequena revisão bibliográfica sobre o tema em questão, onde se pretende abordar os compósitos estruturais e dar a conhecer a cortiça;
- no capítulo 3 são apresentados e descritos os ensaios de fratura *Double Cantilever Beam* (DCB) e *End-Notched Flexure* (ENF), destinados à caracterização em modo I e em modo II, respetivamente, bem como a metodologia utilizada na obtenção da energia de fratura;

- no capítulo 4 é apresentado todo o procedimento experimental que envolve a caracterização dos materiais utilizados, produção dos provetes e descrição dos ensaios realizados;
- no capítulo 5 é efetuada a análise dos resultados experimentais, sendo aplicada a metodologia apresentada no capítulo 3 para determinar a energia de fratura. É também feita a análise das superfícies de fratura;
- no capítulo 6 são apresentados os resultados numéricos, baseados nos resultados obtidos experimentalmente, e é feita uma comparação entre eles;
- nos capítulos 7 e 8 são apresentadas as conclusões deste trabalho e as perspectivas de trabalhos futuros, respetivamente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO AOS MATERIAIS COMPÓSITOS

Hoje em dia, diversas áreas do domínio tecnológico exigem o estudo e desenvolvimento de materiais que possuam propriedades que não podem ser alcançadas de maneira isolada por materiais convencionais. Pretende-se que estes novos materiais consigam conjugar baixa densidade com boas propriedades específicas e bom desempenho em aplicações de elevada exigência a custos inferiores. A procura destes materiais, com características específicas, conduziu ao desenvolvimento dos denominados materiais compósitos [1].

De um modo geral, os compósitos resultam da combinação macroscópica de dois ou mais materiais distintos, cujas propriedades se complementam, originando um material cujas características globais são superiores às dos constituintes isolados. O exemplo mais conhecido são os compósitos fibrosos, os quais resultam de dispersão de fibras num material aglomerante, designado por matriz [2, 3].

Uma das razões principais para as excelentes propriedades dos materiais compósitos resulta do facto de as fibras apresentarem propriedades mecânicas muito superiores às dos materiais idênticos na forma maciça. No entanto, devido à reduzida secção resistente, as fibras não podem ser diretamente usadas em aplicações estruturais de engenharia, o que implica a utilização de uma matriz [2]. Embora possam ser infinitas as combinações de materiais usados nos compósitos, as formas que os seus constituintes podem apresentar são limitadas. O

reforço e a matriz são os constituintes principais num compósito. O reforço é o elemento resistente e também o responsável pela estrutura interna do compósito. Por outro lado, a matriz dá forma estável e acrescenta a necessária tenacidade ao compósito, bem como assegura a distribuição eficiente de carga pelo reforço. Também determina a temperatura máxima de serviço do compósito e controla a sua resistência ao meio ambiente, além de permitir uma superfície com bom acabamento [2, 4].

Os materiais compósitos podem ser classificados segundo vários critérios, entre os quais se encontram o tipo de matriz e a forma do reforço. Pode-se então distinguir os compósitos de matriz polimérica, metálica e cerâmica. Considerando a forma do reforço, é possível identificar os compósitos reforçados por fibras, por partículas e os compósitos estruturais, os quais englobam as estruturas *sandwich* e os laminados [5]. As propriedades e o comportamento dos materiais compósitos dependem principalmente da natureza dos materiais constituintes, bem como da forma e da distribuição dos mesmos, e do grau de ligação entre eles através da interface [4]. Em geral, os compósitos destacam-se por apresentarem elevada rigidez e resistência específica, assinalável leveza, boa durabilidade, boa capacidade de amortecimento e boa resistência à corrosão, e baixo coeficiente de expansão térmica. Além disso, permitem uma grande flexibilidade de projeto. Contudo, estes materiais acarretam algumas desvantagens, tais como a falta de compreensão sobre o custo total real, a falta de confiança na conceção e dimensionamento (dado que não existem regras de projeto bem definidas) [6].

A nível das aplicações, os materiais compósitos encontram-se disseminados por diversas áreas, as quais abrangem os transportes (onde a indústria automóvel tem particular destaque), artigos desportivos, componentes elétricos e eletrónicos, bem como indústrias de grande exigência e visibilidade tecnológica, como a aeronáutica e a indústria espacial e de defesa [2].

Mais recentemente, muito devido a questões de sustentabilidade ambiental, os compósitos que incorporam fibras naturais (juta, linho e sisal, por exemplo) têm despertado grande interesse na comunidade científica. Estes compósitos são designados por compósitos verdes. As fibras naturais são usadas essencialmente devido à sua baixa densidade, baixo preço, durabilidade, sustentabilidade e biodegradabilidade [1].

Uma vez que o trabalho exposto neste relatório é relativo a compósitos estruturais, apenas estes serão estudados com mais detalhe.

2.2 ESTRUTURAS SANDWICH

Na verdade, a indústria aeronáutica foi a grande impulsionadora das estruturas *sandwich*, uma vez que estas se destacam pelo facto de permitirem obter uma excelente relação resistência/peso. Hoje em dia, as estruturas sandwich também são significativamente utilizadas na indústria aeroespacial e naval [7]. A construção de uma estrutura sandwich envolve, na sua forma mais simples, a utilização de duas placas de reduzida espessura e de elevada rigidez estrutural, denominadas por faces, separadas entre si e coladas a um material geralmente de maior espessura mas com densidade e rigidez muito inferiores, denominado núcleo. O núcleo tem como funções manter as faces afastadas à distância correta e evitar que as faces deslizem uma relativamente à outra, ou seja, tem de ser minimamente rígido e resistente à compressão e tração, bem como suportar os esforços de corte que ocorrem nos planos paralelos às faces. Além disso, é também responsável pelo isolamento térmico e acústico, e contribui para a redução global de peso da estrutura. Por outro lado, as faces têm como função principal suportar os esforços de flexão da estrutura, trabalhando uma face à compressão e outra à tração.

O número de combinações de materiais é substancialmente vasto, permitindo assim otimizar a estrutura consoante a aplicação em causa. Na sua maioria as faces são constituídas por materiais como o aço, ligas de alumínio, madeira e materiais compósitos, sendo que estes últimos oferecem um alargado leque de opções aliado às excelentes propriedades mecânicas e baixa densidade. Dentro dos compósitos, as fibras mais usadas são as fibras de vidro, carbono e aramida. Os materiais normalmente utilizados como núcleo são as espumas poliméricas (de baixa densidade), como é o caso do PVC e do poliuretano (ver Figura 2.1), a madeira de balsa, a cortiça e os ninhos de abelha (ver Figura 2.2) [8, 9].



Figura 2.1 - Espuma de Poliuretano [9].

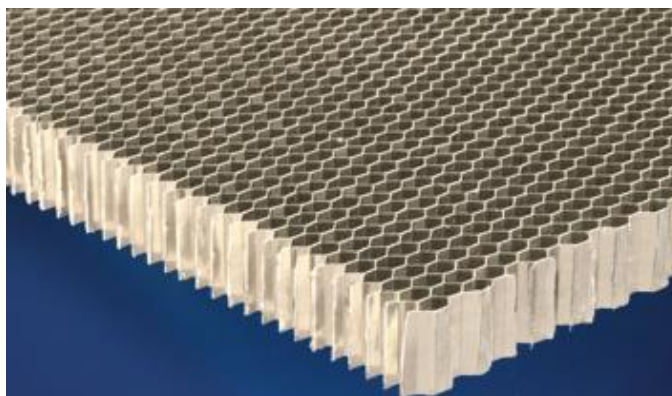


Figura 2.2 - Estrutura do núcleo em ninho de abelha de alumínio [10].

Na união de dois ou mais componentes podem ser usados vários processos de ligação, tais como a soldadura, o aparafusamento, o uso de adesivos, entre outros. No caso das estruturas *sandwich*, a união das faces ao núcleo é feita através de adesivos. Um adesivo pode ser definido como sendo um material que ao ser aplicado na superfície de outros, provoca a adesão entre eles criando uma nova estrutura resistente a tensões de corte e de arrancamento. As partes a unir são designadas por substratos.

Numa ligação adesiva podem ocorrer dois tipos de falhas: adesiva ou coesiva (ver Figura 2.3). A falha adesiva ocorre quando a rotura se dá pela interface substrato/adesivo. Este tipo de falha é resultado de uma má aderência devido, por exemplo, a más preparações ou incompatibilidade de materiais, pelo que é considerada inaceitável. Na falha coesiva, a rotura ocorre no próprio adesivo, o que pode ser confirmado pela existência de películas de adesivo nas superfícies dos substratos após rotura. A falha do substrato acontece quando a resistência que se estabelece na interface e no interior do adesivo é superior à resistência dos substratos. Estes dois tipos de falha (coesiva e do substrato) são representativos de uma boa adesão, e, portanto, são os que se deseja que ocorram [8].

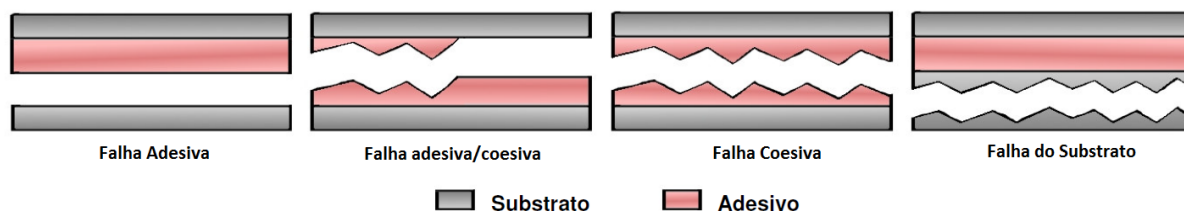


Figura 2.3 – Tipos de falha de adesivos. Adaptado de [9].

Nas secções seguintes apenas se desenvolvem os materiais usados na componente prática deste trabalho, ou seja, os laminados de fibras de carbono e a cortiça.

2.3 LAMINADOS DE FIBRAS DE CARBONO

Em geral, os compósitos laminados resultam da sobreposição de várias camadas de compósitos fibrosos, as quais podem ser dispostas segundo uma ou várias direções, dando origem a laminados unidirecionais ou multidirecionais, respetivamente. Na maioria das aplicações são usados os laminados multidirecionais, uma vez que as propriedades transversais dos unidirecionais são relativamente fracas. O número, as orientações e as sequências de empilhamento das camadas são variáveis de projeto, que dependem da aplicação em causa.

Um exemplo de compósito fibroso usado nos laminados são os pré-impregnados. Estes são constituídos por uma mistura de fibras e resina para posterior consolidação. São considerados semi-produtos de elevado custo para aplicações de grande exigência. Existem dois tipos de pré-impregnados: de base termoendurecível e de base termoplástica. Normalmente, para o reforço usam-se fibras contínuas unidirecionais ou tecidos à base de vidro, carbono ou aramida. Nos pré-impregnados termoendurecíveis, o sistema de resina mais comum é o epóxico. À resina são adicionados inibidores que impedem a cura antes do processamento, desde que armazenados a baixas temperaturas. Estes pré-impregnados destacam-se pela sua maneabilidade, capacidade de auto-adesão das camadas durante o empilhamento. Por outro lado, os pré-impregnados termoplásticos são mais rígidos e difíceis de manter em posição durante o empilhamento. Para além de não apresentarem capacidade de auto-adesão de camadas, o processamento posterior exige pré-aquecimento [2].

2.4 CORTIÇA

A cortiça é um material que tem acompanhado a Humanidade desde tempos imemoriais e que bem cedo se distinguiu em aplicações ligadas à construção nomeadamente nos países mediterrânicos de onde provém. Atualmente, devido ao desenvolvimento de novos materiais derivados, e à crescente importância da utilização de materiais naturais e sustentáveis, a sua utilização em revestimentos e isolamentos estendeu-se a todo o mundo, bem como a indústrias exigentes, como é o caso da aeronáutica [11].

A cortiça é um material cem por cento natural, reciclável e renovável, que tem a sua origem na casca do sobreiro (*Quercus Suber L.*). O sobreiro é uma árvore que floresce em regiões específicas do Oeste Mediterrânico (Portugal, Espanha, Sul de França, parte de Itália e Norte de África). Este tipo de árvore necessita de uma grande quantidade de luz solar e de uma

combinação insólita de um elevado nível de humidade e de um baixo nível de pluviosidade. A qualidade e a espessura da casca variam de acordo com as condições específicas de crescimento da árvore. Portugal é o maior produtor de cortiça do mundo, processando cerca de 75% da mesma. Tal é possível devido às condições climáticas existentes associadas aos excelentes solos [8, 12].

A cortiça é extraída do tronco e ramos do sobreiro, sob a forma de peças semi-tubulares, normalmente no Verão (corresponde à fase mais ativa do crescimento da cortiça). Os sobreiros são desbastados a cada 9 ou 10 anos, sendo que a sua exploração só começa quando atingir cerca de 0,7 m de perímetro quando medido a 1,5 m do solo (ver Figura 2.4).



Figura 2.4 – Descortiçamento [13].

Quando a cortiça é extraída dos sobreiros, fica exposta a parte exterior do entrecasco, a qual é “empurrada” pelas sucessivas camadas de novas células que se vão formando no interior, dando origem à “raspa”. A “raspa” é o principal constituinte da parte externa da cortiça (também designada por “costa”). Devido ao crescimento, esta parte seca, contrai e endurece, e fendilha (ver Figura 2.5).

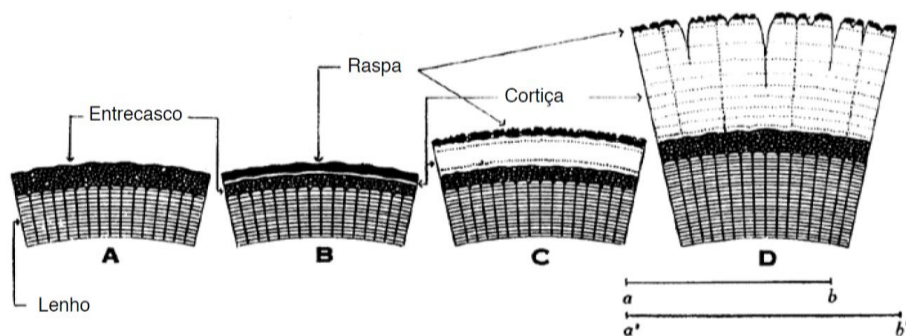


Figura 2.5 – Representação esquemática da cortiça [11].

O primeiro descortiçamento produz uma cortiça chamada virgem. Esta caracteriza-se por ter uma estrutura, espessura e densidade irregulares, bem como uma dureza que se torna difícil de trabalhar. Descortiçamentos sucessivos dão origem a cortiça com superfície exterior mais regular, designada por cortiça de reprodução ou amadia. Antes de ser trabalhada, toda a cortiça deve ser fervida, de modo a limpá-la, aumentar a sua espessura (e consequentemente reduzir a sua densidade) e torná-la mais macia e flexível. Antes da cozedura, as células encontram-se comprimidas de forma irregular, mas durante este processo, o gás contido no seu interior expande. Desta forma, a estrutura celular da cortiça torna-se mais uniforme e o seu volume aumenta em cerca de 20 por cento [11, 12].

2.4.1 ESTRUTURA MACROSCÓPICA

Macroscopicamente, a cortiça caracteriza-se por ser um material leve, elástico e praticamente impermeável a líquidos e gases, sendo também inócuo e praticamente imputrescível, apresentando a capacidade de ser comprimido sem expansão lateral ($\nu \approx 0$).

A estrutura da cortiça é anisotrópica. As três direções principais definidas para a cortiça são: a radial (paralela aos raios da árvore), a axial (direção vertical da árvore) e tangencial (perpendicular às outras duas). As secções perpendiculares a estas direções são designadas por tangencial, transversal e radial, respetivamente (ver Figura 2.6). A anisotropia deixa de ser sentida nos aglomerados de cortiça, uma vez que os grânulos estão dispostos aleatoriamente.

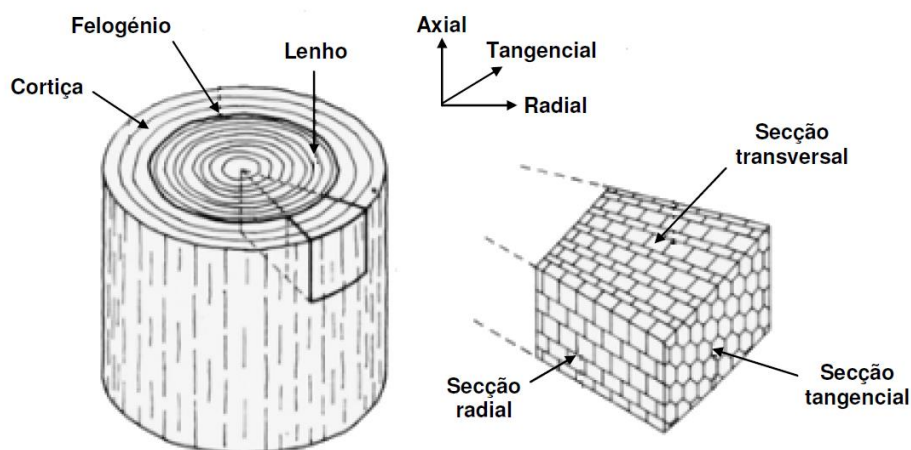


Figura 2.6 – Representação de um elemento de volume da casca do sobreiro e respetiva nomenclatura das direções e secções [8].

Há alguns aspetos exteriores que são indicadores da qualidade da cortiça, tais como a cor clara da cortiça virgem, a lisura e macieza da cortiça de reprodução. O tipo de poros, a sua

dimensão e quantidade, e a sua distribuição também são determinantes na qualidade da cortiça [11].

2.4.2 ESTRUTURA MICROSCÓPICA

Microscopicamente, a cortiça pode ser descrita como um tecido homogêneo de células de paredes finas, arranjadas de forma regular sem espaço intercelular, possuindo uma estrutura alveolar, idêntica à estrutura ninho de abelha (ver Figura 2.7).

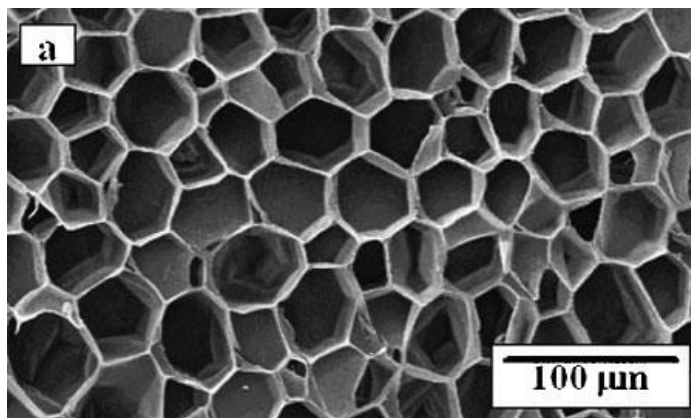


Figura 2.7 - Micrografia SEM da secção tangencial da cortiça natural (após tratamento) [12].

As membranas celulares possuem um certo grau de impermeabilização e estão cheias de um gás, normalmente considerado semelhante ao ar, que ocupa cerca de 90% do volume. Por este facto, a cortiça apresenta baixa densidade [11, 12]. A estrutura das paredes das células da cortiça ainda causa alguma controvérsia. De um modo geral, considera-se que a parede celular é constituída pelas paredes primária, secundária e terciária, as quais apresentam diferentes composições químicas e são distintas. A parede primária é a primeira a ser formada. A parede secundária, que se deposita sobre a primária, é a camada mais espessa, sendo possível distinguir nela subcamadas. A parede terciária, que se deposita sobre a secundária, reveste interiormente as células. von Hohnel foi um dos primeiros investigadores a propor um modelo para a estrutura da parede celular da cortiça (ver Figura 2.8). De acordo com este autor, a parede que separa duas células de cortiça adjacentes é constituída por cinco lamelas, sendo uma delas comum às duas células e designada por lamela média. von Hohnel considerou que a lamela média é constituída por celulose fortemente lenhificada (que confere rigidez), e que de cada um dos seus lados, existe uma lamela de suberina, sendo a cavidade interior das células revestida por uma lamela de natureza celulósica. Mais tarde, Sitte propôs um novo modelo para a estrutura da parede celular (ver Figura 2.9). Segundo este investigador, cada “meia-parede” é composta por uma lamela média e uma parede primária, finas e lenhificadas,

uma parede secundária e uma parede terciária. A parede secundária é constituída por camadas alternadas de suberina e ceras, as quais conferem impermeabilidade, enquanto a parede terciária contém lenhina e celulose. De acordo com o modelo proposto, a parede celular é atravessada por canais muito finos, designados canalículos, que permitem a comunicação entre as células [8, 11, 14].

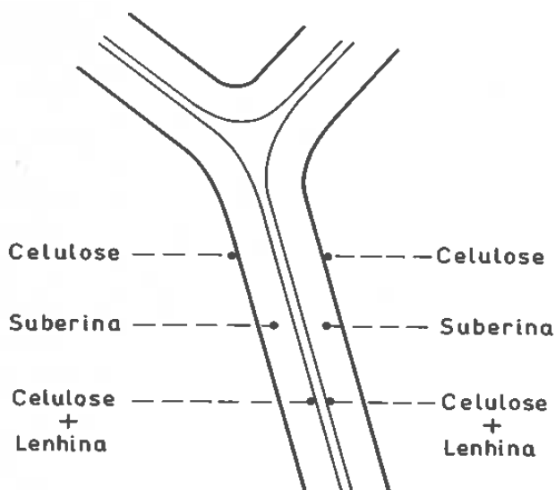


Figura 2.8 – Modelo da estrutura da parede celular da cortiça proposto por von Hohnel [14].

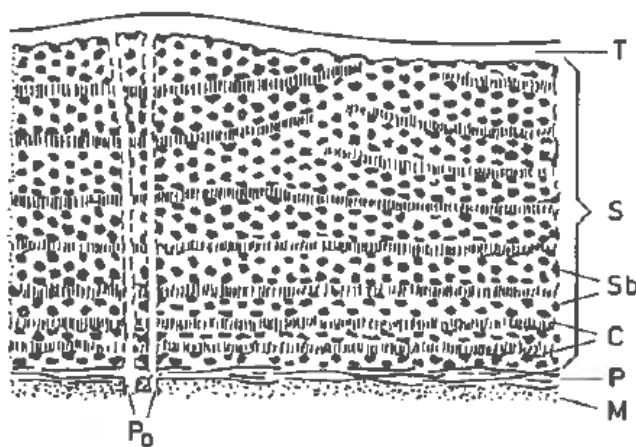


Figura 2.9 – Modelo de “meia-parede” celular da cortiça proposto por Sitte: M – lamela média, P – parede primária, C – ceras, Sb – suberina, S – parede secundária, T – parede terciária, P₀ - canalículos [14].

Quando a cortiça é comprimida, as suas células encurvam e dobram, não lhe conferindo praticamente qualquer expansão lateral, havendo uma posterior recuperação devida à ação do gás comprimido no interior das mesmas [11]. As dimensões das células podem variar bastante, quer de cortiça para cortiça, quer numa mesma prancha de cortiça. Diferentes períodos de formação correspondem a células de diferentes dimensões. Quanto maior for a espessura e menor a altura das paredes das células, mais resistente à flexão e à encurvadura é a cortiça [1, 11].

2.4.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química da cortiça tem sido largamente estudada e depende de fatores como a origem geográfica, clima e características do solo, idade (virgem ou de reprodução) e condições de crescimento. A Tabela 2.1 sumariza a constituição química da cortiça.

Tabela 2.1 – Constituição química da cortiça [11].

Suberina	45 %	Principal componente das paredes celulares da cortiça, responsável pela sua elasticidade e impermeabilidade
Lenhina	27 %	Segundo componente estrutural mais importante das paredes celulares da cortiça
Polissacarídeos	12 %	Componentes das paredes das células que ajudam a definir a textura da cortiça
Ceróides	6 %	Repelem a água e contribuem para a impermeabilidade
Taninos	6 %	Conferem cor e permitem a conservação do material
Cinzas	4 %	

2.4.4 PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades físicas da cortiça resultam, em grande medida, da sua constituição química e da sua estrutura microscópica. (ver Tabela 2.2).

As propriedades da cortiça são inúmeras, destacando-se entre elas as seguintes [1, 8]:

- Leveza (baixa densidade)
- Boa elasticidade e compressibilidade
- Baixo coeficiente de *Poisson*
- Grande capacidade de dissipação de energia em vibrações
- Grande capacidade de absorção de energia em impacto
- Elevado coeficiente de atrito
- Bom isolante acústico e térmico
- Baixa condutibilidade elétrica
- Boa resistência ao fogo, não liberta gases nem alimenta a propagação da chama
- Impermeabilidade (a líquidos e gases).

Tabela 2.2 – Propriedades gerais da cortiça.

	Referência [12]	Referência [8]	Referência [15]
Densidade	120-180 kg/m ³ (cortiça amadia) 160-240 kg/m ³ (cortiça virgem)	170 kg/m ³ (cortiça amadia)	180 kg/m ³ (cortiça amadia)
Condutividade Térmica	0,045 W/m.K (cortiça) 0,025 W/m.K (ar) 0,2 W/m.K (parede das células da cortiça)	0,045 W/m.K (cortiça)	0,045 W/m.K (cortiça)
Calor Específico	350 J/kg.K	350 J/kg.K	350 J/kg.K
Coeficiente de Fricção	0,97 (direção radial - R) 0,77 (direção não-radial - NR)	-----	0,3
Isolamento Acústico	1,2x10 ⁵ kg/m ² .s ⁻¹	-----	-----

A baixa densidade da cortiça é principalmente devida à estrutura alveolar e ao alto teor de gás existente no interior das pequenas células da mesma. Este aglomerado de pequenas almofadas de ar concede à cortiça a sua excelente compressibilidade, enquanto a sua impermeabilidade é justificada pela suberina presente nas paredes celulares. Como consequência, as células são herméticas, o que contribui para as excelentes propriedades de isolante térmico e de elasticidade da cortiça. A cortiça é também um excelente isolante acústico, o que se deve à sua baixa densidade e ao seu elevado teor de porosidade, sendo grande parte do som absorvido transformado em energia térmica [1, 8, 12].

2.4.5 COMPORTAMENTO DA CORTIÇA À COMPRESSÃO

A Figura 2.10 mostra, de uma forma esquemática e idealizada, uma curva de compressão de um material celular, com um patamar intermédio bem definido entre ε_c e ε_f .

As curvas de compressão da cortiça têm o aspeto que se mostra na Figura 2.11. Neste caso, o patamar é substituído por uma região de declive ($d\sigma/d\varepsilon$) pequeno. São apresentadas duas curvas, uma referente à direção radial (R) e outra referente às direções axial e tangencial

(NR). Pela sua análise constata-se que a direção radial é um pouco mais resistente à compressão do que as outras direções.

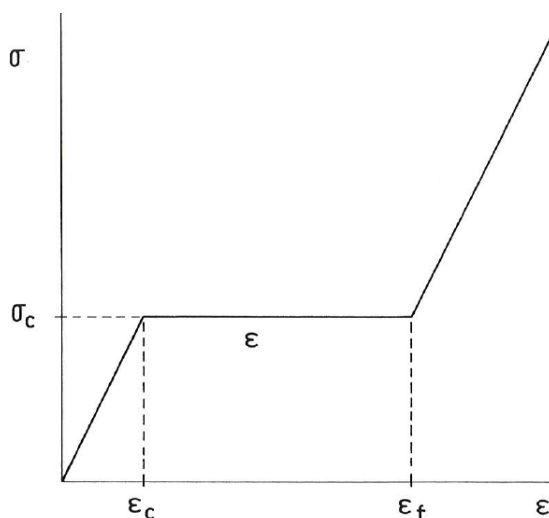


Figura 2.10 – Representação esquemática da curva de compressão de um material celular [14].

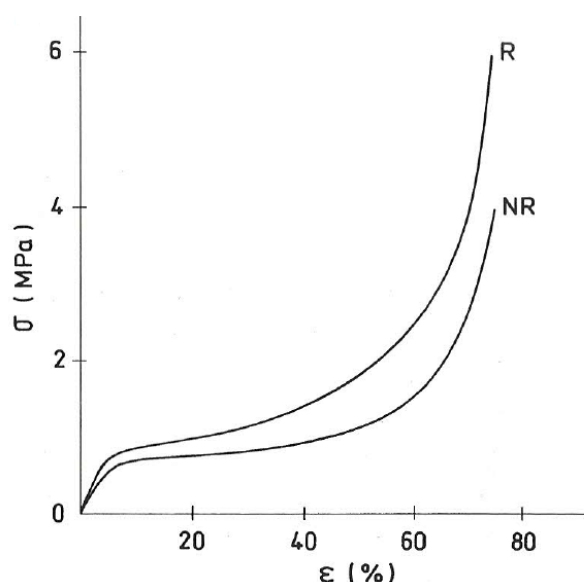


Figura 2.11 – Curvas de compressão experimentais da cortiça cozida (R-compressão radial; NR – compressão não-radial) [14].

Qualquer que seja a direção de compressão, a curva de compressão da cortiça compreende três regiões, que estão associadas a mecanismos de deformação distintos. Estas regiões correspondem à deformação elástica (viscoelástica) da cortiça, ao colapso das células e ao esmagamento das células (ou densificação), sucessivamente.

A primeira região, para tensões e deformações pequenas (até 7%, aproximadamente), apresenta um declive elevado. O comportamento é considerado elástico e não-linear. De facto, pela análise das curvas experimentais, constata-se que a rigidez diminui ligeiramente, à

medida que ε aumenta, pelo que a curva $\sigma(\varepsilon)$ tem a concavidade voltada para baixo. Na realidade, a deformação na cortiça é considerada viscoelástica, uma vez que a deformação apenas desaparece parcialmente quando se retira a força de compressão. A deformação verificada resulta principalmente da flexão das paredes e arestas das células da cortiça. O módulo de Young (médio) é dado pelo declive médio da curva na região elástica.

Quando a tensão atinge um determinado valor σ_c , correspondente a uma extensão ε_c (ver Figura 2.10), inicia-se uma segunda região na curva de compressão. O módulo de Young médio pode também ser calculado pelo quociente σ_c/ε_c . Normalmente, $\sigma_c \simeq 1$ MPa e $\varepsilon_c \simeq 8\%$ pelo que $E \simeq 12$ MPa. No entanto, os valores de E podem variar muito, entre 7 e 25 MPa, dependendo do tipo de cortiça, da direção de compressão, da temperatura, da taxa de deformação e do teor de humidade. Ao atingir-se σ_c (tensão de cedência), as células colapsam, por encurvadura. A forma das células colapsadas é significativamente diferente da sua forma inicial, apresentando paredes dobradas e onduladas, podendo haver contacto entre elas, mas, em geral, sem fraturarem. Esta deformação não é reversível, isto é, após a descarga, a célula não volta à sua forma inicial. Esta região intermédia na cortiça termina para uma extensão elevada, ε_f , da ordem dos 70%. O valor da tensão correspondente é um pouco mais elevado do que σ_c , dado que, como se referiu, o “patamar” não é horizontal nas curvas experimentais.

Para valores superiores a ε_f , a tensão sobe abruptamente, o que se traduz num aumento significativo do declive ($d\sigma/d\varepsilon$) na parte final da curva. Nesta região, as células, que sofreram colapso por encurvadura plástica na região intermédia, continuam a ser comprimidas. As paredes encurvadas começam a ser comprimidas umas contra as outras, havendo cada vez mais contacto. É de realçar que para $\varepsilon > 85\%$ (que raramente ocorre na prática), as paredes celulares da cortiça aparentam manter-se intactas, sem sofrer fratura [14].

Durante um ensaio de compressão despende-se energia, sendo que o seu valor (por unidade de volume) corresponde à área sob a curva $\sigma-\varepsilon$ de compressão. No caso da cortiça, essa energia assume valores relativamente altos (da ordem de $1,5 \times 10^{-6}$ J/m³), o que indica que a cortiça é um material com elevada capacidade de absorção de choques [8, 12]. A energia é absorvida enquanto as paredes se deformam plasticamente por flexão ou encurvadura. Durante o regime elástico, é absorvida uma pequena fração de energia. É ao longo da zona intermédia da curva de compressão (correspondente ao patamar), que se inicia com o colapso das células por encurvadura ou esmagamento, que são absorvidas elevadas quantidades de energia [16].

2.4.6 COMPORTAMENTO DA CORTIÇA À TRAÇÃO

Na Figura 2.12 estão traçadas as curvas obtidas em ensaios de tração da cortiça até à rotura para uma cortiça cozida. As curvas para as direções não radiais (axial e tangencial) são um pouco diferentes da curva apresentada para a direção radial, na qual é possível observar uma região intermédia instável (com flutuações de carga). A justificação para o aparecimento desta região é o aparecimento de micro-fendas sucessivas que se propagam apenas a uma curta distância (ou seja, às células mais próximas) e depois cessam. Nas solicitações não radiais a rotura ocorre para tensões de tração de aproximadamente 0,8 MPa após uma extensão de cerca de 7%. No caso da direção radial, a rotura ocorre para tensões e extensões muito superiores, aproximadamente 1,2 MPa e 18%, respetivamente.

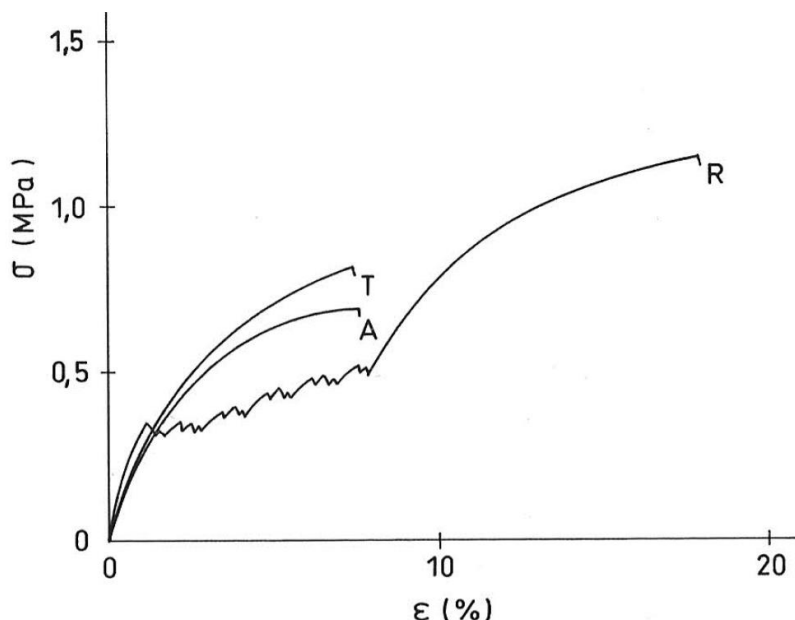


Figura 2.12 – Curvas $\sigma(\epsilon)$ de tração da cortiça segundo as três direções principais (R-radial; T-tangencial; A-axial) [14].

A cortiça apresenta comportamentos diferentes à compressão e à tração. Nas curvas de tração não existe um “patamar”, como acontece no caso da compressão. A parte inicial das curvas não é linear, sendo, portanto, necessário definir um módulo de Young médio. Para as direções não radiais este módulo é de cerca de 25 MPa, enquanto para a direção radial é de cerca de 38 MPa. Verifica-se, assim, que o E em compressão é substancialmente inferior ao E em tração em qualquer direção de simetria material. A rigidez das paredes celulares é tanto maior quanto menor é a ondulação das paredes. Ora, quando se traciona a cortiça, diminui-se a ondulação e, consequentemente, o módulo de Young é superior [12, 14].

Na Tabela 2.3 podem ser consultadas algumas propriedades mecânicas da cortiça.

Tabela 2.3 – Propriedades Mecânicas da Cortiça (R-direção radial; NR-direções não radiais).

	Referência [12]	Referência [8]	Referência [15]
Módulo de Young (compressão), cortiça natural	$E_R = 8\text{-}20 \text{ MPa}$ $E_{NR} = 13\text{-}15 \text{ MPa}$	$E_R = 14 \text{ MPa}$ $E_{NR} = 11 \text{ MPa}$	$E = 13 \text{ MPa}$
Módulo de Young (compressão), cortiça cozida	$E_R = 6 \text{ MPa}$ $E_{NR} = 8\text{-}9 \text{ MPa}$	-----	-----
Módulo de Rigidez à Distorção	-----	$G_{NR} = 2,5 \text{ MPa}$	-----
Tensão e Extensão de Cedência	-----	$\sigma_R = 1 \text{ MPa}$ $\varepsilon_R = 7\%$ $\sigma_{NR} = 0,8 \text{ MPa}$ $\varepsilon_{NR} = 7\%$	-----
Tensão de Ruptura à Tração	$\sigma_R = 1 \text{ MPa}$ $\sigma_{NR} = 1,1 \text{ MPa}$	$\sigma_R = 1,5 \text{ MPa}$ $\sigma_{NR} = 1,2 \text{ MPa}$	-----
Módulo de Young (tração)	$E_R = 13,2 \pm 0,7 \text{ MPa}$ $E_A = 12 \pm 1,5 \text{ MPa}$ $E_T = 9,6 \pm 1,4 \text{ MPa}$	$E_R = 20 \text{ MPa}$ $E_{NR} = 15 \text{ MPa}$	$E = 18 \text{ MPa}$
Coeficiente de Poisson	$\nu_{R/NR} = 0\text{-}0,097$ $\nu_{NR/R} = 0\text{-}0,064$ $\nu_{NR/NR} = 0,26\text{-}0,5$	$\nu_{R/NR} = 0,097$ $\nu_{NR/R} = 0,064$ $\nu_{NR/NR} = 0,26$	$\nu = 0,18$

2.4.7 MECANISMOS DE FRATURA DA CORTIÇA

Na cortiça, tal como em muitos outros materiais, a fratura ocorre por propagação de uma fenda. Esta inicia-se num local onde a tensão de tração/compressão é máxima e suficiente para provocar a sua propagação. Há dois mecanismos básicos de fratura da cortiça em modo I. Num deles, a fenda avança por ruptura transversal de sucessivas paredes celulares. É o mecanismo que ocorre nos sistemas de propagação R-NR (tração radial, direção de avanço da fenda NR) (ver Figura 2.13.a). No outro mecanismo, a propagação da fenda ocorre ao longo das paredes, como se estas fossem cortadas longitudinalmente. Neste caso, a fenda pode avançar ao longo de uma lamela da parede celular (possivelmente a lamela média) ou ao

longo de uma interface entre lamelas. É o mecanismo que ocorre nos sistemas de propagação NR-R (tração NR, direção de avanço R) e NR-NR (tração NR, direção de avanço NR) (ver Figura 2.13.b e Figura 2.13.c, respectivamente). No caso NR-NR, a fenda executa um percurso em ziguezague. O primeiro mecanismo (fratura transversal das paredes) ocorre, em geral, quando a sollicitação é aplicada na direção radial, enquanto o segundo (fratura ao longo das paredes) ocorre quando a sollicitação é aplicada numa direção não-radial [14, 17].

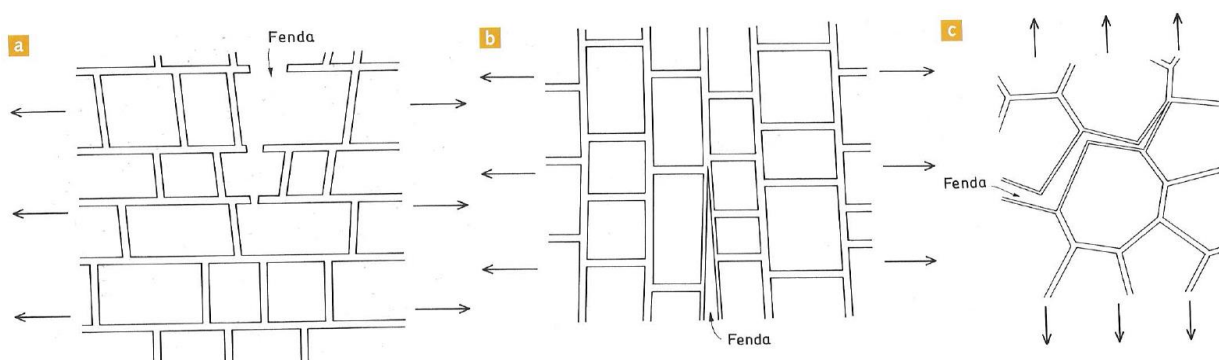


Figura 2.13 – Representação esquemática dos mecanismos de fratura da cortiça. a) fratura transversal das paredes; b) e c) fratura ao longo das paredes [14].

2.4.8 COMPARAÇÃO COM OUTROS MATERIAIS ESPUMOSOS

A cortiça apresenta uma variação limitada das suas propriedades, devido à sua morfologia e estrutura. Por isso, não é possível obter uma gama tão vasta de propriedades como acontece, por exemplo, nas espumas de poliuretano (PU) ou de polietileno (PE). Contudo, a cortiça consegue competir com os melhores materiais sintéticos em aplicações específicas.

As propriedades mecânicas relativamente pobres da cortiça limitam o seu uso em aplicações de engenharia. Na Figura 2.14 encontra-se um mapa de seleção de materiais, no qual se compara o módulo de Young específico com a resistência à compressão específica (os materiais com melhor desempenho são os localizados no canto superior direito). Espumas com paredes celulares rígidas (metais, cerâmicos) oferecem obviamente maior resistência a sollicitações mecânicas do que as paredes celulares onduladas da cortiça. Globalmente, a cortiça apresenta propriedades mecânicas equivalentes às das espumas poliméricas flexíveis, podendo ser usada em aplicações equivalentes, tendo a vantagem de possuir boas propriedades de amortecimento.

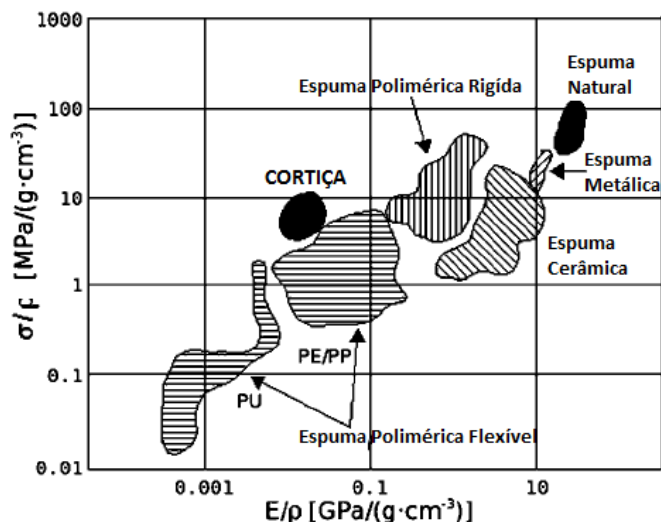


Figura 2.14 – Mapa de seleção de materiais comparando a resistência à compressão específica (σ/ρ) com o módulo de Young específico (E/ρ) [12].

A cortiça apresenta mais vantagens quando se compara a condutividade térmica com a resistência à compressão (ver Figura 2.15). A baixa condutividade térmica e razoável resistência à compressão, tornam a cortiça um excelente material de isolamento térmico. Os materiais com melhor desempenho do mapa encontram-se no canto inferior direito, e a cortiça apresenta um comportamento similar às espumas sintéticas poliméricas rígidas [12].

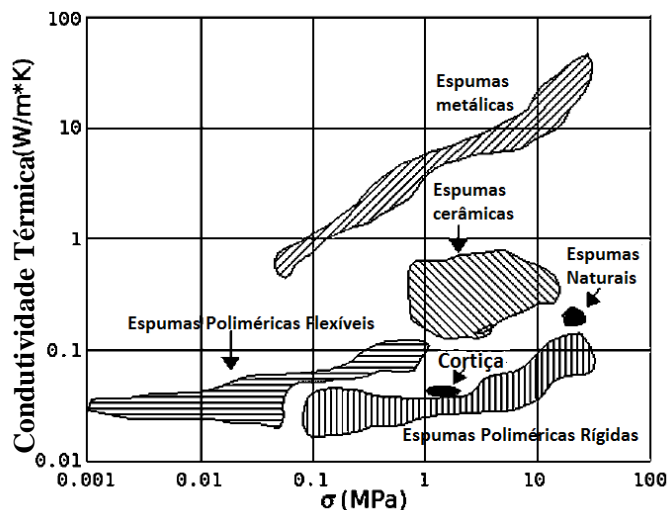


Figura 2.15 – Mapa de seleção de materiais comparando a condutividade térmica com a resistência à compressão (σ) [12].

2.4.9 AGLOMERADOS DE CORTIÇA

Os aglomerados são, em termos económicos, o segundo produto mais importante da indústria corticeira. O seu aparecimento possibilitou a utilização integral de toda a cortiça produzida.

Para além disso, permitiram a obtenção de produtos semelhantes à cortiça natural, com formas geométricas mais complexas.

Os aglomerados de cortiça são habitualmente classificados em dois tipos: aglomerados compostos e aglomerados puros. Nos aglomerados compostos (também designados por aglomerados brancos), são utilizados granulados obtidos a partir da trituração de cortiça virgem, bocados, refugos e desperdícios de outras operações de processamento (aparas, rolhas defeituosas). No fabrico deste tipo de aglomerados, os grânulos de cortiça são unidos entre si por meio de aglutinantes, ligantes ou adesivos vários, alheios à própria cortiça. Estes aglomerados mantêm as propriedades da cortiça que os originou, podendo mesmo melhorar certos comportamentos mecânicos, dependendo do material de adição usado.

Os aglomerados puros mais relevantes são os expandidos e são obtidos por auto-aglomeração térmica dos grânulos. Estes são também designados por aglomerados negros, devido à sua coloração. Na sua produção é usado um triturado mais grosseiro, obtido essencialmente por trituração de falca (cortiça virgem crua) e de outros tipos de cortiça de pior qualidade. A falca possui um teor de extrativos (ceróides) superior ao dos restantes tipos de cortiça, os quais funcionam como ligantes intergranulares naturais.

Os aglomerados são usados em pavimentos e revestimentos de casas, hospitais, escritórios, superfícies comerciais, entre outros [8, 11]. Na Figura 2.16 pode-se visualizar o aglomerado de cortiça utilizado no trabalho experimental desta dissertação.



Figura 2.16 – Aglomerado de cortiça usado no trabalho experimental – CoreCork NL20.

Na Figura 2.17 encontra-se a curva de compressão do aglomerado NL20. Pela sua análise constata-se que esta apresenta uma forma muito semelhante a qualquer uma das curvas representadas na Figura 2.11.

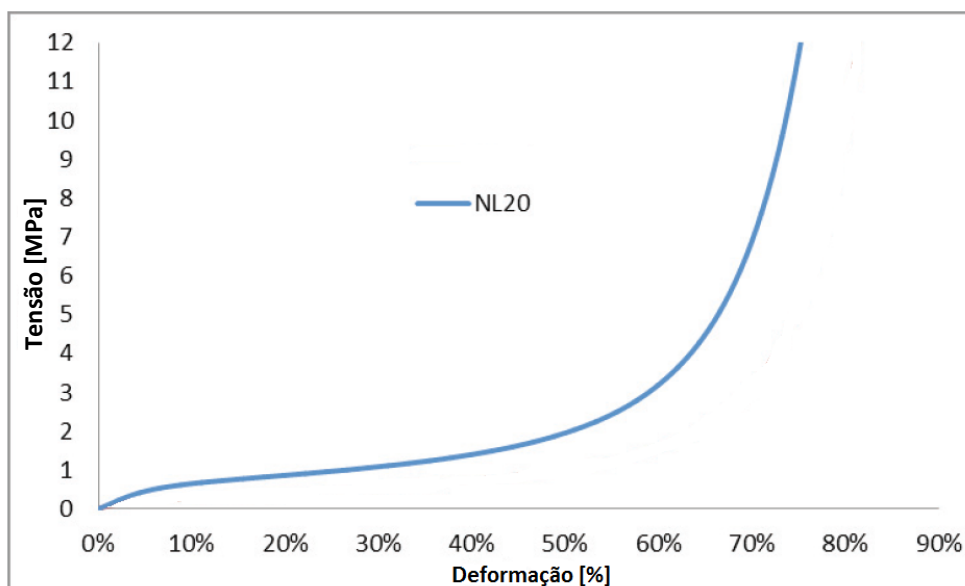


Figura 2.17 – Curva de compressão do aglomerado NL20 [18].

2.5 APLICAÇÃO DA MECÂNICA DA FRATURA AOS COMPÓSITOS

A Mecânica da Fratura visa caracterizar o comportamento dos materiais à fratura. Inicialmente começou por ser aplicada somente no estudo da fratura de construções aeroespaciais executadas em ligas metálicas de alta resistência, dando origem à Mecânica da Fratura Linear Elástica. Posteriormente passou a ser aplicada em construções soldadas de aço, o que levou ao aparecimento da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica. Mais recentemente, com a disseminação do uso dos compósitos, tem vindo a aumentar o interesse da aplicabilidade da Mecânica da Fratura nestes materiais [2]. Efetivamente, uma das principais formas de deterioração detetadas em componentes feitos a partir de materiais compósitos consiste na iniciação e na propagação de fissuras interlaminares (ocorre geralmente entre camadas diferentemente orientadas). Este processo de fratura pode conduzir a perdas importantes de rigidez e de resistência, pelo que é de grande importância caracterizar corretamente a sua tolerância à presença deste tipo de defeitos [2, 19].

Como ilustrado na Figura 2.18, a propagação de uma fenda pode ocorrer segundo três modos diferentes. O modo I representa o modo de abertura, e ocorre quando esforços de tração provocam a abertura da fenda. Os modos II e III são modos de corte, que ocorrem quando a frente de fenda é sujeita a esforços de corte. No modo II as superfícies da fenda efetuam um movimento relativo perpendicular à frente de fenda. Já no modo III esse movimento relativo é paralelo à frente de fenda [2, 20].

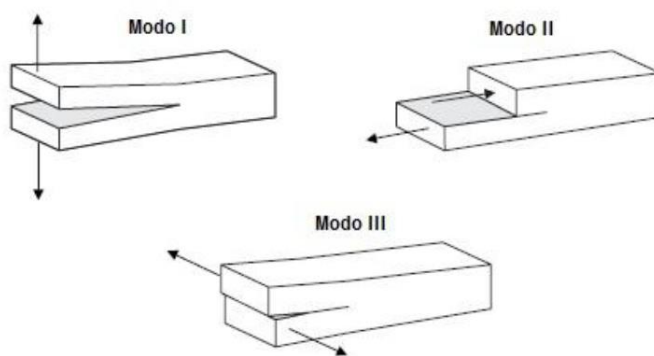


Figura 2.18 – Modos de propagação de uma fenda [20].

A determinação da taxa crítica de libertação de energia ou energia de fratura, G_c , em ensaios de fratura interlaminar, tem-se revelado um procedimento eficiente na quantificação da resistência dos materiais compósitos à delaminação. As situações de carregamento mais estudadas são as de modo I, de modo II e de modo misto (I+II) [2, 19].

É importante referir que os laminados unidirecionais $[0^\circ]_n$ têm particular interesse para estes estudos, dado a sua elevada rigidez à flexão e à sua capacidade de manter uma propagação auto-semelhante [2].

2.6 INVESTIGAÇÃO RECENTE NA ÁREA DA CORTIÇA

Por ser um material natural, com características tão peculiares, a cortiça tem sido objeto de estudo por parte de muitos autores. A variabilidade da estrutura e das propriedades da cortiça é um dos maiores entraves na sua caracterização. Como já se referiu, as suas características dependem de diversos fatores, como a origem geográfica, o clima e características do solo, idade (virgem ou de reprodução), entre outros. Têm sido feitos estudos no sentido de perceber de que modo estes fatores influenciam a cortiça [21]. O comportamento mecânico da cortiça sujeita a tensões de tração na direção tangencial foi estudado por *Anjos et al.* [22]. Estes autores observaram que a resistência à tração da cortiça (módulo de Young, tensão de rotura e a respetiva deformação) varia com o aumento da distância ao eixo do sobreiro, apresentando uma tendência decrescente. A morfologia macroscópica e microscópica da cortiça, a sua composição química, as suas propriedades físicas e mecânicas, bem como as suas aplicações foram estudadas com grande detalhe por *Silva et al.* [12]. *Rosa et al.* [17] estudaram os mecanismos de deformação e de fratura de cortiça sujeita a esforços de tração. Em 2004, *Fortes et al.* [14] publicaram um livro sobre a cortiça, o qual se baseou em inúmeros trabalhos realizados pelos próprios autores e por outros investigadores desta área. Este livro inclui

informação sobre a formação e crescimento da cortiça, a sua estrutura e composição química, as propriedades físicas, térmicas, elétricas, viscoelásticas e acústicas, o comportamento mecânico à compressão, tração, fratura e torsão, entre outros.

A combinação de cortiça com materiais compósitos tem sido alvo de estudo de vários projetos ([1], [7], [8], [23], [24]). *Dias* [1] estudou o comportamento ao impacto a baixa velocidade de laminados de fibra de vidro/epóxico com camadas de cortiça. Para tal, realizou uma série de ensaios (de corte, de flexão, de impacto Charpy). No entanto, os resultados não foram satisfatórios, o que, segundo o autor, terá resultado da fraca impregnação das fibras, bem como do elevado teor global de cortiça, que afetou a rigidez do laminado. *Soares* [7] e *Carvalho* [8] apresentaram trabalhos sobre a análise do comportamento mecânico e a identificação do tipo de falha em estruturas sandwich com núcleos de cortiça. *Soares* [7] ensaiou à flexão provetes sandwich com faces em carbono-epóxico e núcleos de aglomerados de cortiça, Rohacell® e ninho de abelha, de modo a poder comparar as propriedades mecânicas dos diferentes provetes. Como era de esperar, os resultados obtidos para os materiais convencionais (Rohacell® e ninho de abelha) foram os melhores. No entanto, o autor chegou à conclusão de que existem francas possibilidades de melhoria dos aglomerados de cortiça para fins estruturais, dado o dano destes ter ocorrido no elemento de ligação dos aglomerados (na resina aglomerante). *Castro et al.* [23] focaram a sua investigação na otimização das propriedades de aglomerados de cortiça-epóxico, de forma a obter um material ideal para o núcleo de estruturas sandwich de baixo peso. Para tal, realizaram ensaios de flexão, de forma a caracterizar a resistência mecânica de diferentes tipos de aglomerados de cortiça. A resistência a solicitações dinâmicas também foi avaliada, a partir de uma série de testes de impacto usando provetes sandwich de carbono e cortiça. Os resultados dos ensaios experimentais revelaram que o desempenho dos aglomerados de cortiça depende essencialmente do tamanho dos grânulos, da sua densidade e do processo de aglutinação usado, sendo possível ajustar estes parâmetros em função da aplicação final. Os resultados também permitiram concluir que os aglomerados de cortiça otimizados possuem algumas propriedades específicas, como é o caso da elevada capacidade de absorção de energia com o mínimo de dano, que os tornam mais eficientes em aplicações estruturais do que os materiais convencionais.

É sabido que a iniciação e propagação de fissuras interlaminares são uma das principais formas de deterioração nos materiais compósitos e constituem uma ameaça à sua integridade. Vários estudos têm sido desenvolvidos, no sentido de aumentar o desempenho dos

compósitos, e, conseqüentemente, a confiança dos projetistas na sua utilização. *Rebello* [19] realizou ensaios em modo I e modo II de carregamento em sistemas compósitos reforçados com fibras unidirecionais de vidro e de carbono, de forma a obter os valores de energia de fratura. O objetivo destes ensaios era estudar a influência do tipo de defeito promotor de delaminação e da espessura dos provetes. *Morais et al.* [25] caracterizaram a fratura interlaminar em modo I de provetes de carbono-epóxico $[0^\circ/90^\circ]_{12}$. Mais recentemente *de Moura et al.* [26, 27] procederam à caracterização à fratura em modo I e modo II de juntas coladas com substratos de carbono-epóxico, recorrendo para tal a um método de tratamento de resultados baseado no conceito de fenda equivalente. Pelos resultados obtidos, verificaram que o método proposto era o mais adequado e o que oferecia resultados mais precisos.

Até agora, os trabalhos elaborados com núcleos de aglomerados de cortiça em estruturas sandwich têm-se concentrado mais na análise do comportamento mecânico e no tipo de dano do núcleo, do que propriamente na sua caracterização à fratura. Assim, pretende-se com esta dissertação aprofundar um pouco mais a investigação sobre o comportamento à fratura em modo I e modo II da cortiça numa estrutura sandwich de C-E.

3 METODOLOGIA UTILIZADA

Neste capítulo descrevem-se de forma detalhada os ensaios e os métodos de tratamento de resultados aplicados na caracterização à fratura em modo I e em modo II de provetes constituídos por C-E e cortiça (ver Figura 3.1).

	Carbono
	Cortiça
	Carbono

Figura 3.1 – Esquema dos provetes de C-E e cortiça.

3.1 ENSAIO *DOUBLE CANTILEVER BEAM*

O ensaio *Double Cantilever Beam* (DCB) é o mutiais utilizado na caracterização à fratura em modo I. Está atualmente normalizado para a medição de G_{Ic} em laminados unidirecionais $[0^\circ]_n$. A sua representação esquemática pode ser vista na Figura 3.2. Os provetes DCB são constituídos por dois braços de igual comprimento L , largura B e espessura $2h$. É introduzida uma fenda inicial de comprimento a_0 , a qual se propaga sob ação das forças P . A norma ISO 15024 recomenda que os provetes tenham um comprimento mínimo de 130 mm e uma largura de 20 mm. Em relação às espessuras, os valores recomendados são de 3 e 5 mm, para laminados de fibra de carbono e de fibra de vidro, respetivamente.

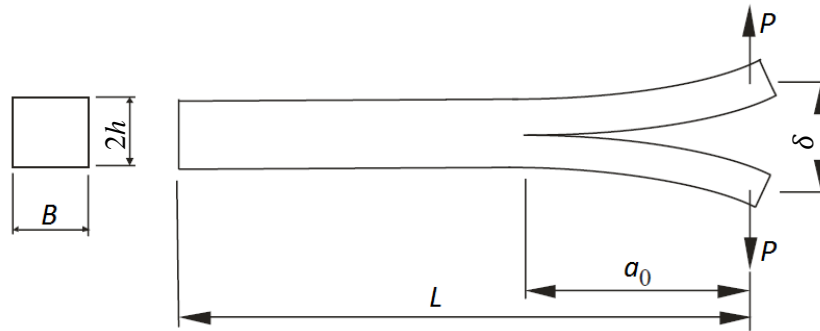


Figura 3.2 – Esquema do ensaio DCB [28].

Durante o ensaio são registados os valores da força P e do deslocamento δ . A uma dada altura, a força P provoca a variação $a - a_0$ do comprimento da fenda inicial [2, 20]. A partir dos dados registados, determina-se taxa de libertação de energia, recorrendo à expressão de Irwin-Kies:

$$G_I = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (1)$$

onde a é o comprimento de fenda e C é a flexibilidade do provete, dada por,

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (2)$$

Os métodos teóricos clássicos usados para se determinar a energia de fratura, tais como o *Compliance Calibration Method* (CCM) ou o *Corrected Beam Theory* (CBT), requerem a medição do comprimento de fenda durante a realização do ensaio, o que constitui uma tarefa de difícil realização em materiais quase frágeis e que pode levar a erros significativos na caracterização à fratura. Na realidade, durante a propagação, nem sempre existe uma extremidade de fenda bem definida nestes materiais devido à existência de uma zona de processo de fratura (ZPF), onde ocorrem complexos fenómenos de dano microestrutural (como plasticidade e iniciação de micro-fendas). De forma a ultrapassar estas dificuldades, utiliza-se o *Compliance Based Beam Method* (CBBM) proposto em [26] e [27], o qual se baseia no conceito de fenda equivalente (que inclui os efeitos da ZPF sobre a energia de fratura) e que depende apenas da flexibilidade do provete durante o ensaio, ou seja, não necessita da medição do comprimento real da fenda durante a sua propagação. Este método baseia-se na teoria de vigas de Timoshenko [20, 28, 29].

3.1.1 DETERMINAÇÃO DA ENERGIA DE FRATURA (G_I)

A Figura 3.3 mostra um esquema da estrutura dos provetes DCB. Para efeitos de estudo, o provete é dividido em dois braços - superior e inferior.

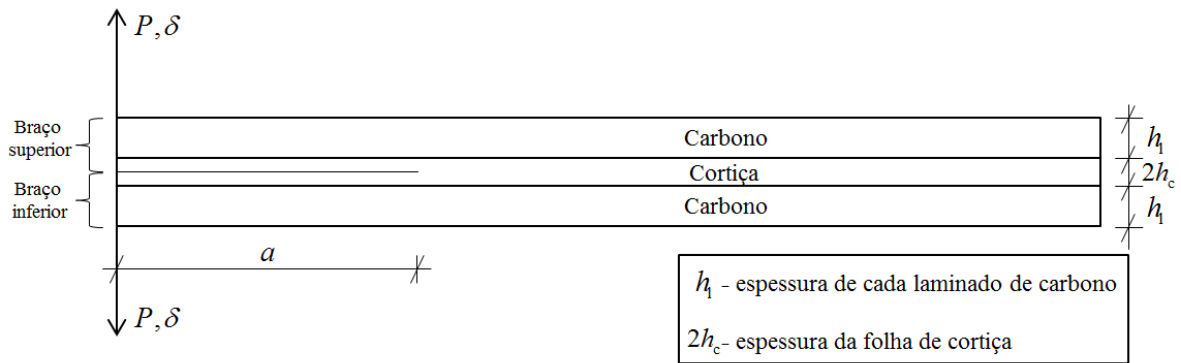


Figura 3.3 - Esquema dos provetes DCB.

A energia elástica de deformação do provete devido aos efeitos de flexão é dada pela seguinte expressão,

$$U_f = 2 \int_0^a \frac{M_f^2}{2D_m} dx = \frac{P^2 a^3}{3D_m} \quad (3)$$

sendo M_f o momento fletor e D_m a rigidez equivalente à flexão de cada braço do provete. Aplicando o teorema de Castigliano, o deslocamento devido à flexão é dado por,

$$\delta_f = \frac{\partial U_f}{\partial P} = \frac{2Pa^3}{3D_m} \quad (4)$$

Assim, a flexibilidade referente à componente da flexão fica igual a,

$$C_f = \frac{P}{\delta_f} = \frac{2a^3}{3D_m} \quad (5)$$

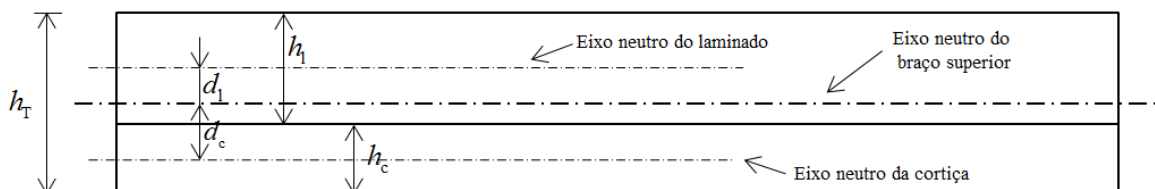


Figura 3.4 – Detalhe do braço superior do provete.

A partir da Figura 3.4 facilmente se determina D_m ,

$$D_m = E_l B \left(\frac{h_l^3}{12} + h_l d_l^2 \right) + E_c B \left(\frac{h_c^3}{12} + h_c d_c^2 \right) \quad (6)$$

sendo E_l e E_c os módulos longitudinais do laminado e da cortiça, respetivamente, e,

$$d_l = \frac{E_c h_c (h_l + h_c)}{2(E_l h_l + E_c h_c)} \quad (7)$$

$$d_c = \frac{h_l + h_c}{2} - d_l$$

as distâncias entre o eixo neutro de cada material e o eixo neutro do conjunto.

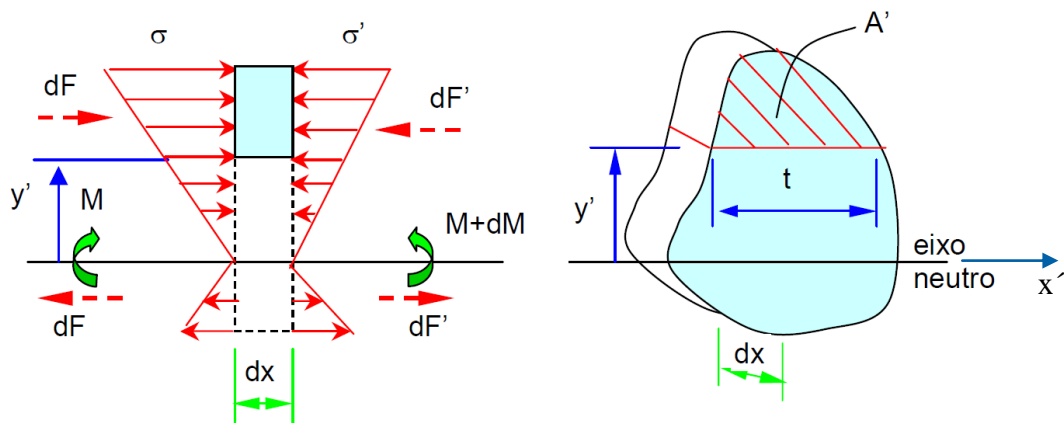


Figura 3.5 – Tensões a atuar num elemento de viga composta (em altura) por diferentes materiais [30].

Considere-se o exemplo de uma viga composta por diferentes materiais apresentado na Figura 3.5. Para determinar as tensões de corte num dos materiais, é necessário impor a equação de equilíbrio de forças na direção x ($\Sigma F_x = 0$), a qual permite chegar à seguinte expressão,

$$\tau_{xy} = \frac{V}{EIB} \int_{A'} E_i y dA \quad (8)$$

onde V é o esforço transversal aplicado na secção analisada, EI é a rigidez equivalente à flexão, B é a largura da secção, E_i e A' são o módulo de elasticidade e a área do material i , respetivamente [30].

Assim, é possível passar ao cálculo das tensões de corte em cada braço do provete. Para tal, são consideradas três zonas, designadas por laminado superior, laminado intermédio e cortiça, como se pode ver na Figura 3.6.

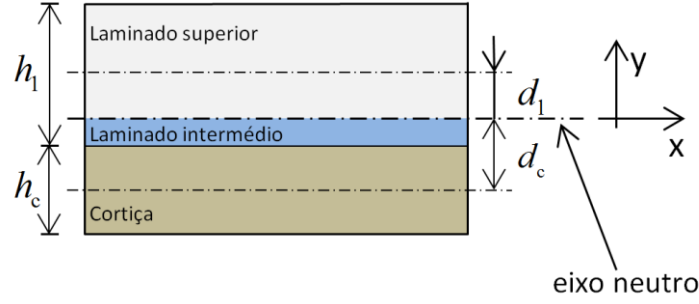


Figura 3.6 – Representação do braço superior do provete DCB.

As tensões de corte no laminado superior são dadas por,

$$\tau_{1s} = \frac{V}{D_m} \int_y^{\frac{h_1}{2} + d_1} y E_1 dy = \frac{V E_1}{2 D_m} \left[\left(\frac{h_1}{2} + d_1 \right)^2 - y^2 \right]; \quad 0 \leq y \leq \frac{h_1}{2} + d_1 \quad (9)$$

As tensões de corte no laminado intermédio são dadas por,

$$\begin{aligned} \tau_{1i} &= \frac{V}{D_m} \left[\int_y^{-d_c + \frac{h_c}{2}} y E_1 dy + \int_{-d_c + \frac{h_c}{2}}^{-d_c - \frac{h_c}{2}} y E_c dy \right] \leftrightarrow \\ \leftrightarrow \tau_{1i} &= \frac{V}{2 D_m} \left[E_1 \left(d_c^2 - d_c h_c + \frac{h_c^2}{4} - y^2 \right) + 2 E_c d_c h_c \right]; \quad -d_c + \frac{h_c}{2} \leq y \leq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Por fim, as tensões de corte na cortiça são dadas por,

$$\tau_c = \frac{V}{D_m} \int_y^{-d_c + \frac{h_c}{2}} y E_c dy = \frac{V E_c}{2 D_m} \left[\left(d_c + \frac{h_c}{2} \right)^2 - y^2 \right]; \quad -\frac{h_c}{2} - d_c \leq y \leq -d_c + \frac{h_c}{2} \quad (11)$$

A Figura 3.7 mostra o diagrama das tensões de corte ao longo de y . A partir deste verifica-se que as tensões de corte são absorvidas quase na sua totalidade pelo carbono. Este procedimento garante a continuidade das tensões de corte na interface entre materiais diferentes, o que pode ser facilmente comprovado pelas equações (10) e (11) fazendo $y = -d_c + \frac{h_c}{2}$.

A energia elástica de deformação devido aos efeitos de corte é dada por,

$$U_{\text{corte}} = 2 \int_0^a \int_{-\left(d_c + \frac{h_c}{2}\right)}^{-d_c + \frac{h_c}{2}} \frac{\tau_c^2}{2 G_{xy(c)}} B dx dy + 2 \int_0^a \int_{-d_c + \frac{h_c}{2}}^0 \frac{\tau_{1i}^2}{2 G_{xy(l)}} B dx dy + 2 \int_0^a \int_0^{\frac{h_1}{2} + d_1} \frac{\tau_{1s}^2}{2 G_{xy(l)}} B dx dy \quad (12)$$

onde $G_{xy(c)}$ e $G_{xy(l)}$ são os módulos de corte da cortiça e do carbono-epóxico, respetivamente.

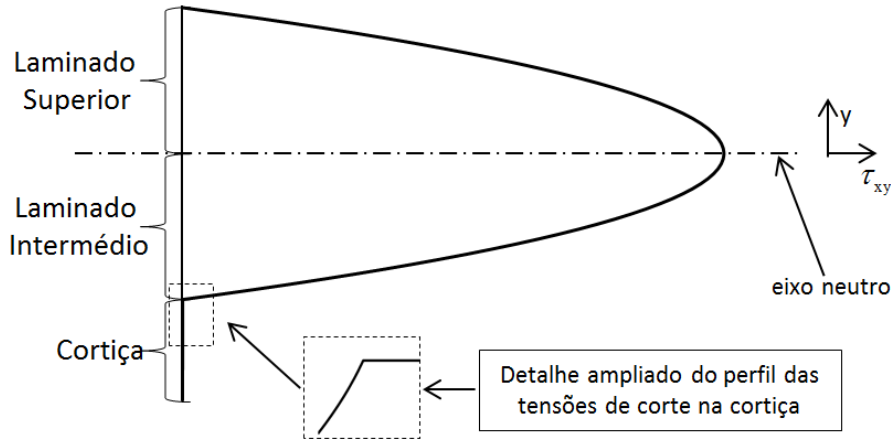


Figura 3.7 - Perfil das tensões de corte ao longo da espessura do braço superior do provete entre $0 \leq x \leq a$.

Resolvendo os integrais duplos da equação (12) e tendo em conta as equações (9) a (11), fica,

$$U_{\text{corte}} = \frac{BV^2 a}{4D_m^2} C_1 \quad (13)$$

onde C_1 é igual a,

$$C_1 = \frac{E_c^2}{G_{xy(c)}} \left[h_c \left(d_c + \frac{h_c}{2} \right)^4 - \frac{7}{15} \left(d_c + \frac{h_c}{2} \right)^5 + \left(-d_c + \frac{h_c}{2} \right)^3 \left[\frac{1}{5} \left(-d_c + \frac{h_c}{2} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(d_c + \frac{h_c}{2} \right)^2 \right] \right] +$$

$$\frac{8E_l^2}{15G_{xy(l)}} \left(\frac{h_l}{2} + d_1 \right)^5 +$$

$$\frac{1}{G_{xy(l)}} \left[-\frac{8E_l^2}{15} \left(-d_c + \frac{h_c}{2} \right)^5 - \frac{8}{3} E_c E_l h_c d_c \left(-d_c + \frac{h_c}{2} \right)^3 - 4E_c^2 d_c^2 h_c^2 \left(-d_c + \frac{h_c}{2} \right) \right] \quad (14)$$

Aplicando o teorema de Castigliano e substituindo V por P ,

$$\delta_{\text{corte}} = \frac{\partial U_{\text{corte}}}{\partial P} = \frac{BP a}{2D_m^2} C_1 \quad (15)$$

Assim, a flexibilidade devido ao corte fica,

$$C_{\text{corte}} = \frac{\delta_{\text{corte}}}{P} = \frac{Ba}{2D_m^2} C_1 \quad (16)$$

A flexibilidade total é dada pelo somatório das flexibilidades de flexão (equação (5)) e de corte (equação (16)),

$$C_T = C_f + C_{\text{corte}} = \frac{2a^3}{3D_m} + \frac{Ba}{2D_m^2} C_1 \quad (17)$$

Para ultrapassar as dificuldades inerentes à monitorização do comprimento de fenda durante o ensaio e para incluir o efeito da ZPF, considerou-se um método baseado no comprimento de fenda equivalente, a_{eq} (ver Figura 3.8). Este método, que se baseia na flexibilidade do provete para obter a_{eq} , denomina-se por *Compliance Based Beam Theory* (CBBM) [26, 27]. O comprimento de fenda equivalente pode ser calculado através da equação (17), considerando a_{eq} em vez de a , como função do valor da flexibilidade total do provete, registada durante o ensaio, sendo $a_{eq} = a + |\Delta| + \Delta a_{ZPF}$. A solução da equação cúbica (equação (17)) pode ser obtida recorrendo ao *software* MATLAB (ver Anexo). O parâmetro Δ é um fator de correção do comprimento de fenda inicial a_0 obtido através da regressão linear $C_T^{1/3} = f(a_0)$. Este parâmetro pode ser determinado numericamente, bastando para isso considerar diferentes comprimentos de fenda iniciais, para poder obter assim, para cada valor de a_0 , o respetivo valor da flexibilidade C_T . Este procedimento permite definir uma regressão linear $C_T^{1/3} = f(a_0)$ com os pontos obtidos (ver Figura 3.9).

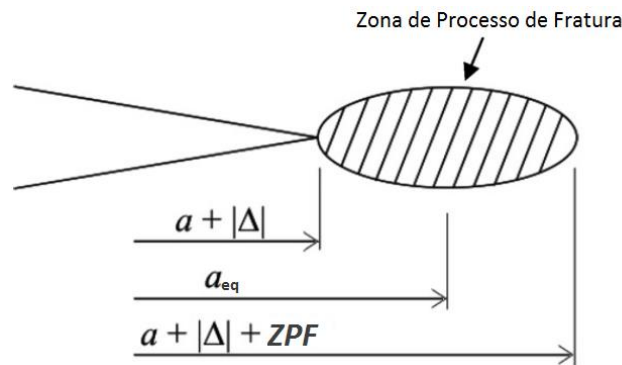


Figura 3.8 – Representação esquemática da ZPF e do conceito de fenda equivalente [27].

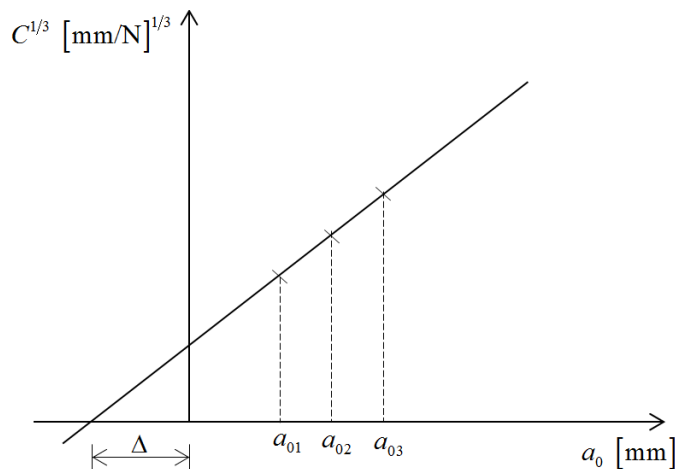


Figura 3.9 – Representação esquemática da obtenção do fator de correção do comprimento de fenda inicial.

Assim, derivando a equação (17) em ordem a a_{eq} e substituindo o resultado obtido em (1), chega-se à expressão final para a energia de fratura em modo I,

$$G_I = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da_{eq}} = \frac{P^2}{2B} \left(\frac{2a_{eq}^2}{D_m} + \frac{BC_1}{2D_m^2} \right) \quad (18)$$

3.2 ENSAIO *END NOTCHED FLEXURE*

O ensaio *End Notched Flexure* (ENF) tem sido o mais usado para a caracterização à fratura em modo II, devido à sua simplicidade. Este pode ser descrito como uma viga simplesmente apoiada, solicitada a meio vão por uma carga de intensidade variável e velocidade de sollicitação constante. A representação esquemática de um provete ENF pode ser vista na Figura 3.10.

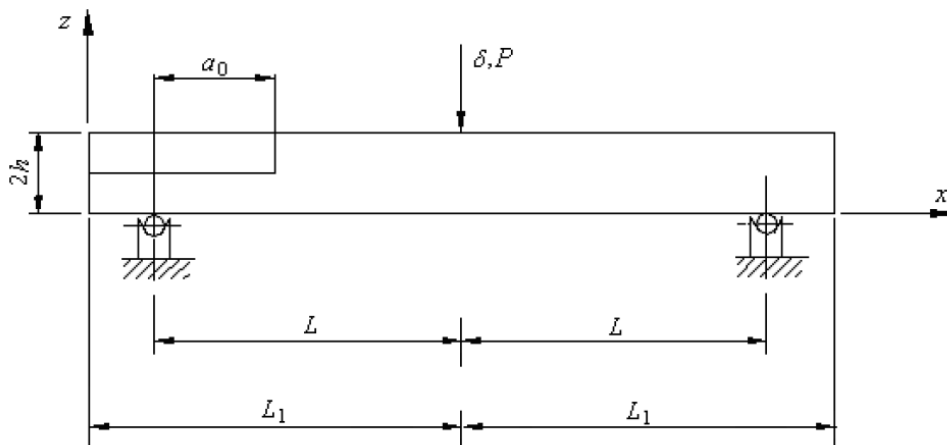


Figura 3.10 – Geometria do provete ENF [28].

É importante referir que a fenda está localizada no eixo neutro do provete (meio da espessura), pelo que a sua propagação é controlada pelas tensões de corte, traduzindo assim um efeito de modo II. À medida que o provete é solicitado são registados os valores da força P e do deslocamento δ , e, tal como nos ensaios DCB, a taxa de libertação de energia é obtida, recorrendo à expressão de Irwin-Kies:

$$G_{II} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (19)$$

e a flexibilidade do provete é dada por,

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (20)$$

Na análise dos resultados dos ensaios ENF é também usado o *Compliance Based Beam Method* (CBBM), devido às razões expostas anteriormente. Adicionalmente, em situações de carregamento em modo II, a carga compressiva provoca o contacto entre as duas faces da fenda, o que dificulta imenso a correta identificação da extremidade desta [2, 29].

3.2.1 DETERMINAÇÃO DA ENERGIA DE FRATURA (G_{II})

A energia elástica de deformação do provete devido aos efeitos de flexão é dada pela seguinte expressão,

$$U_f = 2 \int_0^a \frac{M_f^2}{2D_m} dx + \int_a^L \frac{M_f^2}{2D_{m_T}} dx + \int_L^{2L} \frac{M_f^2}{2D_{m_T}} dx \quad (21)$$

sendo M_f o momento fletor, D_m a rigidez equivalente à flexão de cada braço do provete ($0 \leq x \leq a$) (equação (6)) e D_{m_T} a rigidez equivalente à flexão da secção total do provete (ver Figura 3.11) ($a \leq x \leq 2L$),

$$D_{m_T} = B \left[2E_l \left(\frac{h_l^3}{12} + h_l \left(\frac{h_l}{2} + h_c \right)^2 \right) + E_c \frac{2h_c^3}{3} \right] \quad (22)$$

Desenvolvendo a equação (21), obtém-se,

$$\begin{aligned} U_f &= 2 \int_0^a \frac{P^2 x^2}{16 \times 2D_m} dx + \int_a^L \frac{P^2 x^2}{4 \times 2D_{m_T}} dx + \int_L^{2L} \frac{P^2 \left(L - \frac{x}{2} \right)^2}{2D_{m_T}} dx \leftrightarrow \\ &\leftrightarrow U_f = P^2 \left(\frac{a^3}{48D_m} + \frac{2L^3 - a^3}{24D_{m_T}} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

Aplicando o teorema de Castigliano, o deslocamento devido à flexão é dado por,

$$\delta_f = \frac{\partial U_f}{\partial P} = 2P \left(\frac{a^3}{48D_m} + \frac{2L^3 - a^3}{24D_{m_T}} \right) \quad (24)$$

Assim, a flexibilidade referente à componente da flexão fica igual a,

$$C_f = \frac{\delta_f}{P} = \frac{a^3}{12} \left(\frac{1}{2D_m} - \frac{1}{D_{m_T}} \right) + \frac{L^3}{6D_{m_T}} \quad (25)$$

A energia elástica de deformação devido aos efeitos de corte entre $0 \leq x \leq a$ é dada pela expressão (13). Neste caso $V = \frac{P}{4}$, pelo que,

$$U_{C(0 \rightarrow a)} = \frac{BP^2 a}{64D_m^2} C_1 \quad (26)$$

Aplicando o teorema de Castigliano,

$$\delta_{C(0 \rightarrow a)} = \frac{\partial U_{C(0 \rightarrow a)}}{\partial P} = \frac{BP a}{32D_m^2} C_1 \quad (27)$$

Assim, a flexibilidade fica,

$$C_{C(0 \rightarrow a)} = \frac{\delta_{C(0 \rightarrow a)}}{P} = \frac{Ba}{32D_m^2} C_1 \quad (28)$$

É agora necessário proceder à determinação da flexibilidade do provete devido ao corte entre $a \leq x \leq 2L$. Serão definidas duas zonas, uma referente à cortiça e outra referente ao laminado (ver Figura 3.11).

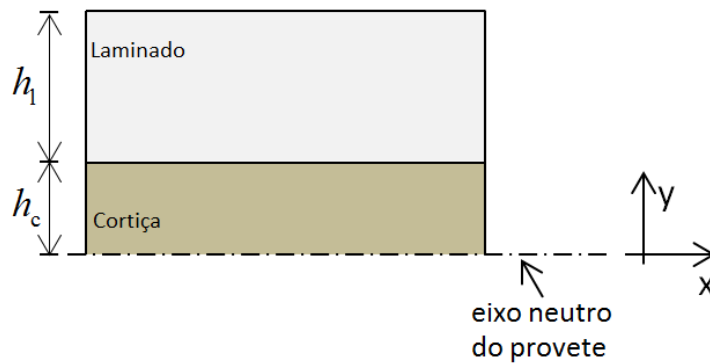


Figura 3.11 – Representação do provete DCB entre $a \leq x \leq 2L$.

As tensões de corte na cortiça são dadas por,

$$\tau_c = \frac{V}{D_{mT}} \left[\int_y^{h_c} y E_c dy + \int_{h_c}^{h_1+h_c} y E_l dy \right] = \frac{V}{2D_{mT}} \left[E_c (h_c^2 - y^2) + E_l h_1 (h_1 + 2h_c) \right]; \quad 0 \leq y \leq h_c \quad (29)$$

As tensões de corte no laminado ficam,

$$\tau_l = \frac{V}{D_{mT}} \int_y^{h_1+h_c} y E_l dy = \frac{V E_l}{2D_{mT}} \left[(h_1 + h_c)^2 - y^2 \right]; \quad h_c \leq y \leq h_1 + h_c \quad (30)$$

A Figura 3.12 mostra o diagrama das tensões de corte ao longo de y da secção de cada provete entre $a \leq x \leq 2L$. Neste caso, também se constata a existência da continuidade das tensões entre o carbono e a cortiça, verificando-se que a cortiça absorve parte substancial do esforço de corte.

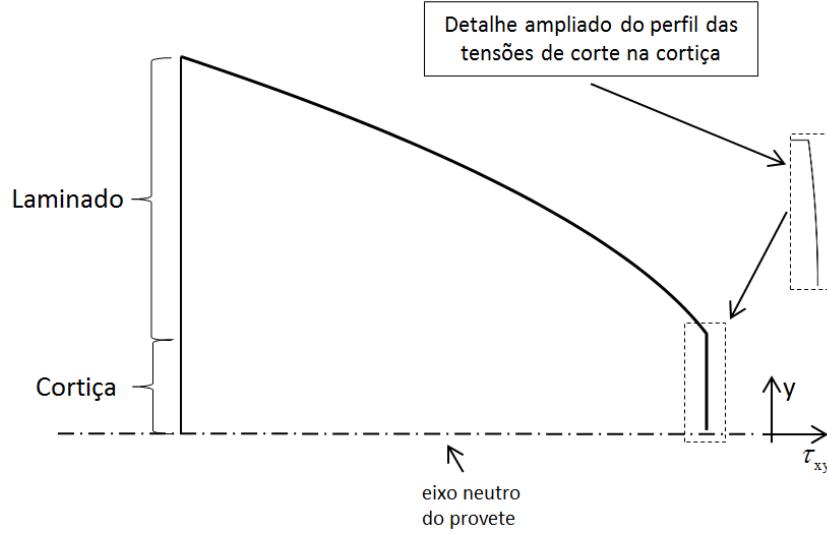


Figura 3.12 – Perfil das tensões de corte ao longo da espessura do provete $a \leq x \leq 2L$.

A energia elástica de deformação devido aos efeitos de corte entre $a \leq x \leq 2L$ é dada por,

$$U_{C(a \rightarrow 2L)} = 2 \int_a^{2L} \int_0^{h_c} \frac{\tau_c^2}{2G_{xy(c)}} B dx dy + 2 \int_a^{2L} \int_{h_c}^{h_1+h_c} \frac{\tau_l^2}{2G_{xy(l)}} B dx dy \quad (31)$$

Desenvolvendo, fica,

$$U_{C(a \rightarrow 2L)} = \frac{B(2L-a)V^2}{4D_{m_T}^2} C_2 \quad (32)$$

onde C_2 ,

$$C_2 = \frac{E_1^2}{G_{xy(l)}} \left[h_1 (h_1 + h_c)^4 + \frac{2}{3} h_c^3 (h_1 + h_c)^2 - \frac{h_c^5}{5} - \frac{7}{15} (h_1 + h_c)^5 \right] + \frac{1}{G_{xy(c)}} \left[\frac{8}{15} E_c^2 h_c^5 + \frac{4}{3} E_c E_1 h_1 h_c^3 (h_1 + 2h_c) + E_1^2 h_1^2 h_c (h_1 + 2h_c)^2 \right] \quad (33)$$

Aplicando o teorema de Castigliano e substituindo V por $\frac{P}{2}$, a expressão (32) fica,

$$\delta_{C(a \rightarrow 2L)} = \frac{B(2L-a)P}{8D_{m_T}^2} C_2 \quad (34)$$

Assim, a flexibilidade é dada por,

$$C_{C(a \rightarrow 2L)} = \frac{B(2L-a)}{8D_{m_T}^2} C_2 \quad (35)$$

A flexibilidade total do provete é igual a,

$$C_T = C_f + C_{C(0 \rightarrow a)} + C_{C(a \rightarrow 2L)} \quad (36)$$

Assim, derivando a equação (36) em ordem a a_{eq} e substituindo o resultado obtido em (1), chega-se à expressão final para a energia de fratura em modo II,

$$G_{II} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da_{eq}} = \frac{P^2}{2B} (3\alpha a_{eq}^2 + \beta) \quad (37)$$

sendo,

$$\alpha = \frac{1}{12} \left(\frac{1}{2D_m} - \frac{1}{D_{m_T}} \right) \quad (38)$$

$$\beta = \frac{BC_1}{32D_m^2} - \frac{B}{8D_{m_T}^2} C_2$$

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritos os detalhes experimentais, nomeadamente os materiais, os métodos de produção das placas e respetivos provetes, bem como os ensaios. Toda esta componente foi realizada nas instalações do INEGI (mais propriamente na unidade de materiais compósitos).

4.1 MATERIAIS

Na produção das placas foram utilizados dois materiais: pré-impregnado unidirecional de fibras de carbono (TEXIPREG HS 160 RM), com 0,145 mm de espessura, e um aglomerado de cortiça (CORECORK NL20), com 1 mm de espessura.

As propriedades mecânicas do pré-impregnado podem ser consultadas na Tabela 4.1, enquanto que as do aglomerado de cortiça podem ser consultas nas Tabelas 4.2 e 4.3.

Tabela 4.1 – Propriedades elásticas de uma lâmina do pré-impregnado [26].

$E_1 = 109 \text{ GPa}$	$\nu_{12} = 0,342$	$G_{12} = 4315 \text{ MPa}$
$E_2 = 8819 \text{ MPa}$	$\nu_{13} = 0,342$	$G_{13} = 4315 \text{ MPa}$
$E_3 = 8819 \text{ MPa}$	$\nu_{23} = 0,342$	$G_{23} = 3200 \text{ MPa}$

Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas do CoreCork NL20. Adaptado de [31].

Densidade	200 kg/m ³
Módulo de Compressão	6 MPa
Módulo de Corte	5,9 MPa
Resistência à Compressão	0,5 MPa
Resistência à Tração	0,7 MPa
Resistência ao Corte	0,9 MPa

Tabela 4.3 – Propriedades mecânicas do CoreCork NL20, numa estrutura sandwich com fibra de vidro. Adaptado de [31].

Módulo de Compressão	23 MPa
Módulo de Flexão	4 MPa
Módulo de Corte	41 MPa
Tensão de Cedência à Flexão	56 MPa
Tensão de Cedência ao Corte	0,9 MPa
Tensão de Cedência à Compressão	2,2 MPa

Em seguida, encontra-se explicado detalhadamente todo o processo de produção das placas laminadas, de onde viriam a ser extraídos os provetes utilizados nos ensaios.

4.2 PRODUÇÃO DAS PLACAS

Para a produção das placas compósitas foi usada uma esquadria de dimensões 300x300x3 mm³. O primeiro passo consistiu no corte do aglomerado de cortiça e do pré-impregnado em quadrados de dimensões 300x300 mm². Posto isto, procedeu-se ao empilhamento das camadas, com as seguintes sequências (ver Figura 4.1):

- Placa 1: carbono [0°], cortiça, carbono [0°], cortiça, carbono [0°], cortiça, carbono [0°]
- Placa 2: carbono [0°]₈, cortiça, carbono [0°]₈

O número de camadas de cada empilhamento foi condicionado pela espessura da esquadria. Na Tabela 4.4 podem ser vistas as espessuras das duas placas no final do empilhamento. O facto de se terem ultrapassado um pouco os 3 mm de espessura, em nada prejudicou o resultado final, uma vez que ao ser prensada, a cortiça comprimiu.

Tabela 4.4 – Espessura das placas produzidas antes da prensagem

$\text{Espessura total placa 1} = 4 \times 0,145 + 3 \times 1 = 3,58 \text{ mm}$
$\text{Espessura total placa 2} = 16 \times 0,145 + 1 \times 1 = 3,32 \text{ mm}$

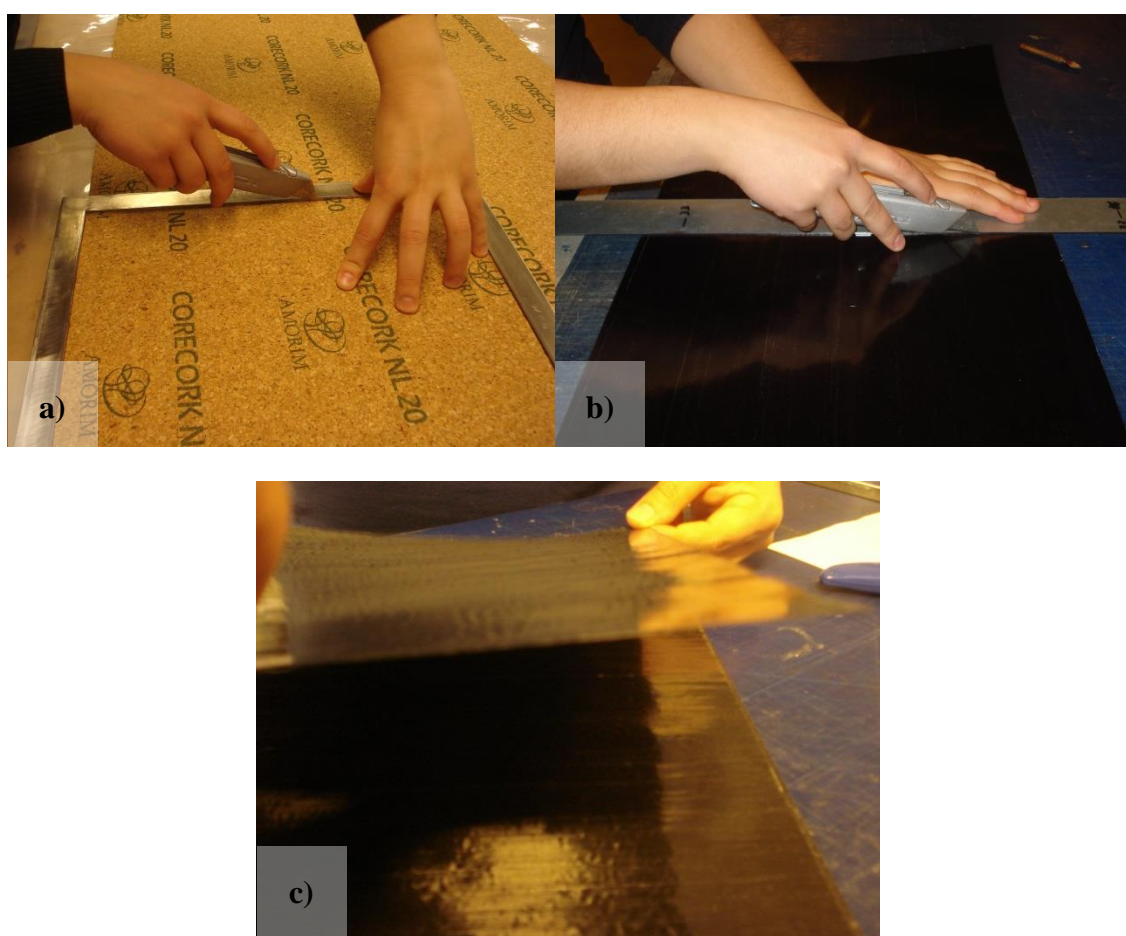


Figura 4.1 – Etapas do processo de produção das placas: a) corte da folha de cortiça, b) corte do carbono-epóxico, c) empilhamento das camadas de carbono-epóxico

A pré-fenda foi obtida a partir da inserção de um filme de Teflon com 25 μm de espessura durante o processo de empilhamento (ver Figura 4.2). A Figura 4.3 mostra um esquema com as dimensões do filme de Teflon (zona sombreada) usado em cada placa.

Na placa 2 foi alterada a disposição do filme de Teflon, de forma a maximizar o aproveitamento da mesma.

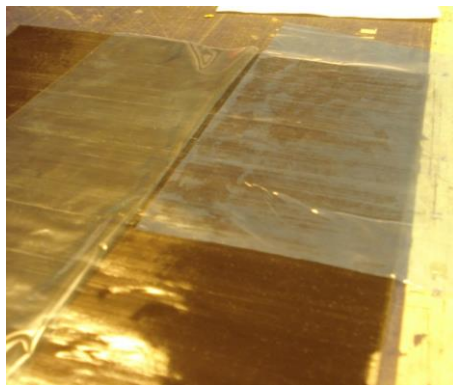


Figura 4.2 – Colocação do filme de Teflon.

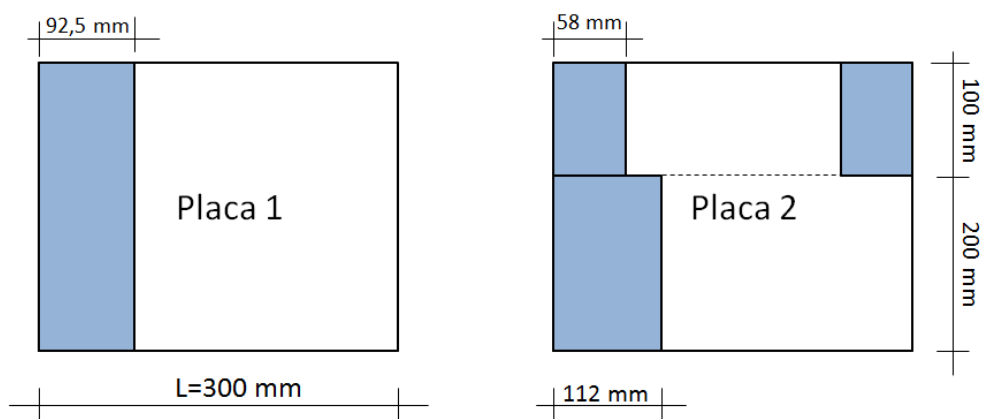


Figura 4.3 - Esquema da disposição do teflon nas placas produzidas.

Por fim, foi colocado filme desmoldante nos topos de cada empilhamento de forma a poderem ser colocados na esquadria (ver Figura 4.4).

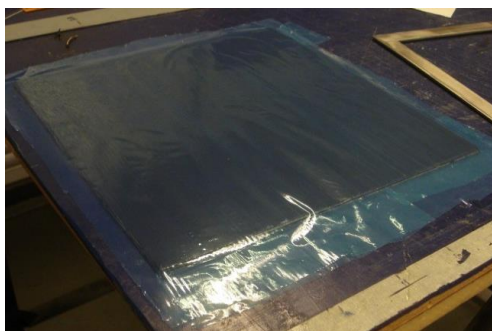


Figura 4.4 – Empilhamento final com filme desmoldante.

A cura foi feita numa prensa de pratos quentes, tendo sido usado o ciclo de cura típico do pré-impregnado de carbono-epóxico (ver Figura 4.5).

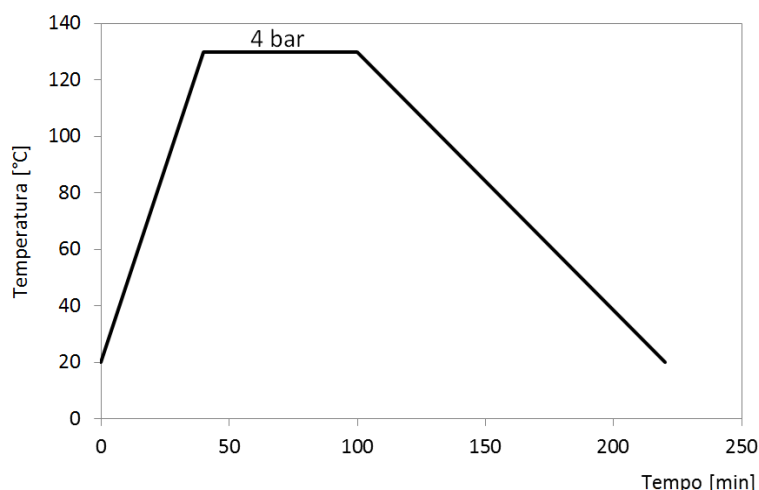


Figura 4.5 – Ciclo de cura do carbono-epóxico.

É importante referir que a resina presente no impregnado de carbono-epóxico foi a responsável pela colagem da cortiça, isto é, funcionou como adesivo. O importante era conseguir uma boa impregnação da cortiça, através da passagem de resina pelos poros desta. Dado que a cortiça apresenta fraca molhabilidade, à partida será a resina que atravessa os seus poros a principal responsável pela união interlaminar, através de um fenómeno de ancoragem. Na Figura 4.6 pode-se visualizar o resultado final da produção placa 1.

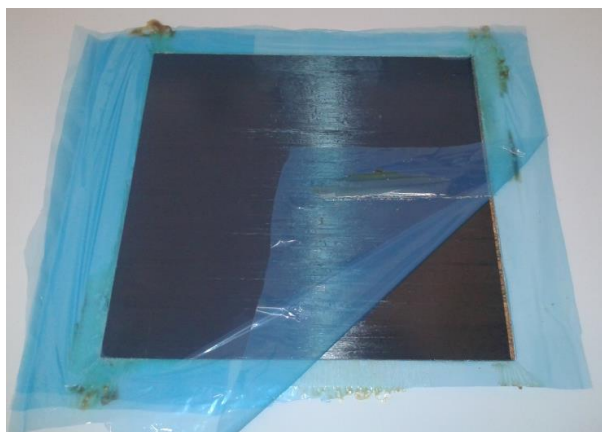


Figura 4.6 – Placa 1 após cura.

4.3 GEOMETRIA E PRODUÇÃO DOS PROVETES

Para a realização dos ensaios de caracterização à fratura foi usada a geometria de carregamento DCB para a determinação de valores de G_{Ic} e a geometria ENF para a determinação de valores de G_{IIc} . A Figura 4.7 ilustra a representação esquemática dos dois ensaios.

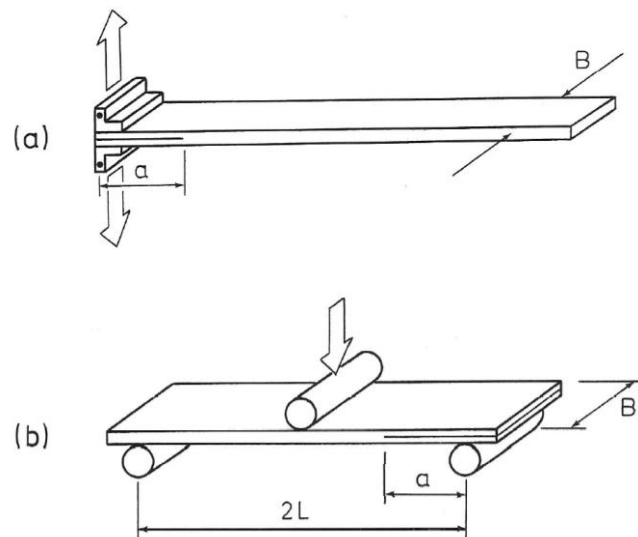


Figura 4.7 – Representação esquemática dos ensaios experimentais: a) DCB; b) ENF [19].

Após a remoção das placas da esquadria procedeu-se ao seu corte segundo a direção das fibras, obtendo-se assim os provetes. Para tal, foi necessário recorrer a uma máquina de corte existente nas instalações do INEGI. Da primeira placa foram obtidos 6 provetes DCB e 7 ENF (ver Figura 4.8), enquanto da segunda foram obtidos 8 provetes ENF e 8 DCB.

Nos DCB foi usado um comprimento nominal $L = 300\text{ mm}$ e $L = 150\text{ mm}$ (ver Figura 3.2), para a placa 1 e 2, respetivamente. Enquanto nos ENF, foi usado $2L = 280\text{ mm}$ e $2L = 200\text{ mm}$ (ver Figura 3.10) nas duas placas.

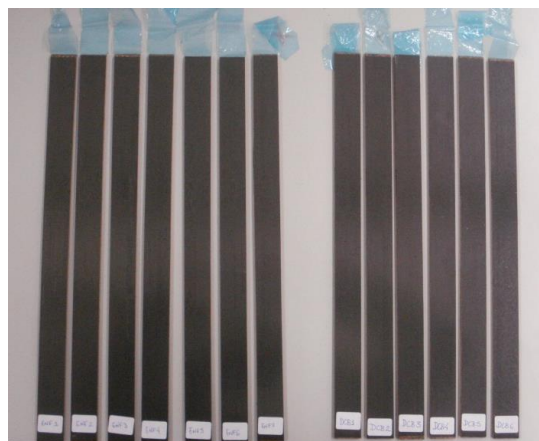


Figura 4.8 – Provetes resultantes da placa 1.

Por forma a possibilitar o acompanhamento visual da progressão da fenda durante os ensaios, uma das faces laterais de cada provete foi marcada com intervalos de 1 mm. Para observar com maior rigor a localização da extremidade da fenda, usou-se uma lupa (ver Figura 4.9).

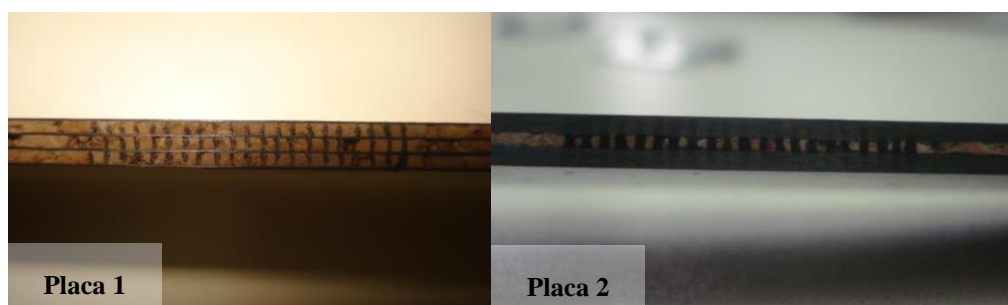


Figura 4.9 – Pormenor da marcação lateral dos provetes.

4.3.1 COLAGEM DOS SUPORTES PARA O ENSAIO DCB

Terminado o processo de corte, foi necessário proceder à colagem de suportes (ver Figura 4.7.a) nos provetes DCB, de forma a permitir a solicitação em modo I. Optou-se por usar dobradiças, uma vez que estas permitiam a rotação livre entre a aba presa na amarra (da máquina de ensaio) e a aba colada ao provete. Para tal, começou-se por passar uma lixa nas zonas onde as dobradiças seriam colocadas e procedeu-se à preparação de um adesivo epóxi estrutural (HB AS/AW 89). Durante a etapa de colagem, foi necessário ter o cuidado de garantir o correto alinhamento das dobradiças em relação à direção transversal das fibras (ver Figura 4.10).



Figura 4.10 – Pormenor da fixação das dobradiças durante o período de cura do adesivo.

4.3.2 MEDIÇÃO DOS PROVETES

Na Tabela 4.5 encontram-se as dimensões dos provetes das duas placas. Os provetes foram numerados de acordo com o tipo de ensaio. Foram realizadas três medições da espessura e largura de cada provete, pelo que o valor apresentado é uma média dessas medições. Os baixos coeficientes de variação (COV) evidenciam o rigor dimensional conseguido no fabrico dos provetes.

Tabela 4.5 – Dimensões médias de cada provete.

Placa nº1				Placa nº2			
Provetes	Espessura [mm]	Largura [mm]	a_0 [mm]	Provetes	Espessura [mm]	Largura [mm]	a_0 [mm]
DCB1	3,041	20,251	92,5	DCB1	3,156	20,198	--
DCB2	3,017	20,441	50	DCB2	3,113	20,201	48
DCB3	3,007	20,119	40	DCB3	3,120	20,177	43
DCB4	3,025	20,166	30	DCB4	3,114	20,468	48
DCB5	3,052	19,910	---	DCB5	3,040	20,356	48
DCB6	3,059	20,260	---	DCB6	3,133	20,363	43
				DCB7	3,085	20,361	48
				DCB8	3,121	20,202	43
Média	3,0335	20,1912		Média	3,1103	20,2908	
COV (%)	0,675	0,874		COV (%)	1,115	0,538	
ENF1	3,039	20,348	82,5	ENF1	3,016	20,270	102
ENF2	3,007	20,284	82,5	ENF2	3,030	20,218	102
ENF3	3,037	20,103	50	ENF3	3,049	20,261	102
ENF4	3,036	20,105	50	ENF4	3,024	20,236	102
ENF5	2,954	20,384	40	ENF5	3,011	20,140	50
ENF6	3,041	20,145	40	ENF6	3,032	20,259	50
ENF7	3,024	19,749	30	ENF7	3,007	20,287	40
				ENF8	3,010	20,315	40
Média	3,0197	20,1597		Média	3,0224	20,2483	
COV (%)	1,037	1,064		COV (%)	0,472	0,261	

Os provetes DCB5 e DCB6 referentes à placa 1, não chegaram a ser ensaiados, pelo que não são apresentados os respetivos valores de a_0 . São apresentados dois valores distintos de a_0 nos provetes DCB da placa 2, uma vez que foram usados dois tipos de dobradiças diferentes.

4.3.3 ENSAIOS DOS PROJETES

A realização dos ensaios ocorreu no Laboratório de Ensaios Mecânicos do INEGI. Todos os projetos foram sujeitos a carregamento contínuo numa máquina de ensaios INSTRON 4208 equipada com uma célula de carga de 1 kN, usando uma velocidade de solitação de 3 mm/min nos ensaios em modo I e II. De cada ensaio obteve-se um registo da variação da carga em função do deslocamento das amarras da máquina. Os ensaios decorreram em ambiente normal de laboratório, a uma temperatura de 23°C.

Nas Figuras 4.11 e 4.12 pode-se visualizar a disposição dos projetos DCB e ENF durante os ensaios em modo I e II, respetivamente.

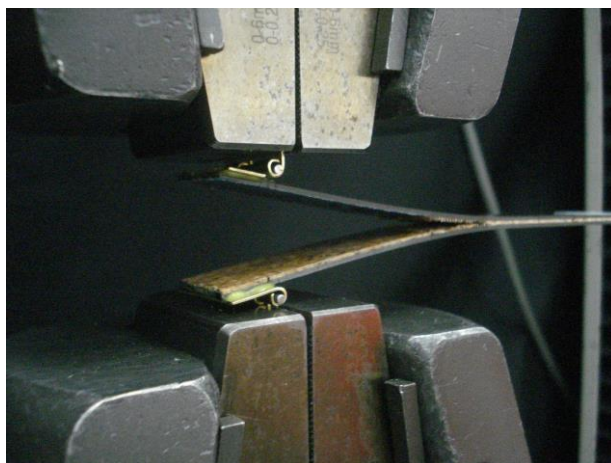


Figura 4.11 – Aspeto geral de um ensaio DCB.



Figura 4.12 – Aspeto geral de um ensaio ENF.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 PLACA 1

Tal como se referiu anteriormente, a placa 1 apresenta a seguinte sequência de empilhamento: carbono $[0^\circ]$, cortiça, carbono $[0^\circ]$, cortiça, carbono $[0^\circ]$, cortiça, carbono $[0^\circ]$. Na Figura 5.1 podem-se ver as diferentes camadas de empilhamento.



Figura 5.1 – Provete DCB referente à placa 1.

Não foi possível obter resultados experimentais referentes aos provetes DCB e ENF da placa 1, uma vez que durante os ensaios ocorreu rotura dos provetes na vizinhança da extremidade da fenda inicial, o que levou ao seu fracasso (ver Figuras 5.2, 5.3, 5.4).

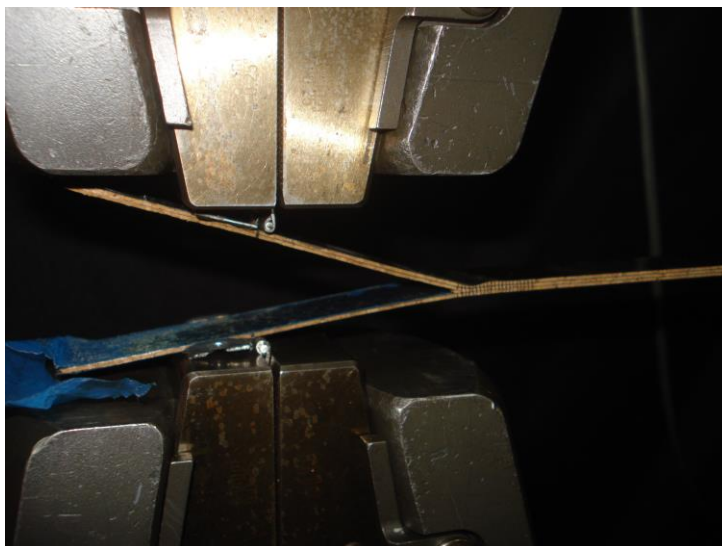


Figura 5.2 – Provete DCB2 durante o ensaio.



Figura 5.3 – Pormenor do dano local ocorrido na face superior no provete DCB2.

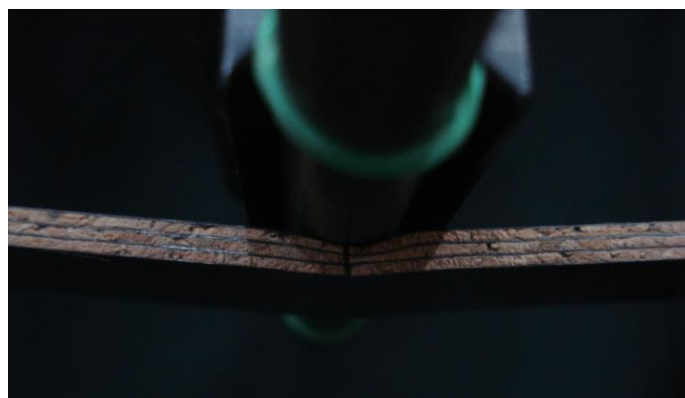


Figura 5.4 – Pormenor do dano na face superior (à compressão) no provete ENF7.

Foram realizados vários ensaios considerando diferentes comprimentos de pré-fenda ($a_0 = 50, 40, 30\text{mm}$), de forma a perceber se valores demasiado elevados de a_0 (correspondentes a momentos fletores superiores nos ensaios DCB e a distâncias menores entre a extremidade da fenda e o ponto central de carregamento nos ensaios ENF) poderiam ser os responsáveis pelo sucedido. No entanto, tal não se verificou. No

fim, chegou-se à conclusão que o elevado teor global da cortiça comparativamente ao C-E sacrificou em demasia a rigidez do laminado, o que associado a uma resistência à fratura da cortiça superior ao esperado levou ao aparecimento da falha. De forma a ultrapassar esta dificuldade, foi feita uma nova placa, na qual se teve o cuidado de aumentar a rigidez, isto é, utilizou-se um número mais elevado de camadas de carbono.

5.2 PLACA 2

Na Figura 5.5 encontra-se um provete obtido da placa 2. Este é formado pela seguinte sequência de empilhamento: carbono $[0^\circ]_8$, cortiça, carbono $[0^\circ]_8$.



Figura 5.5 – Provete DCB referente à placa 2.

5.2.1 ENSAIOS DCB

5.2.1.1 CURVAS FORÇA-DESLOCAMENTO

Durante os ensaios DCB, foram registados os valores de força e de deslocamento, obtendo-se assim as curvas $P-\delta$. Na Figura 5.6 encontram-se reunidas todas as curvas $P-\delta$ experimentais. Nesta figura não aparece a curva referente ao provete DCB1, uma vez que este foi usado como teste, e como tal não houve registo dos resultados experimentais. De uma forma geral, constata-se que todas as curvas apresentam o mesmo andamento, apesar de haver diferenças de rigidez inicial, o que leva ao aparecimento de dois “grupos” de curvas. Esta diferença está relacionada com os valores de a_0 considerados. Provetes com menor valor de a_0 (cerca de 43 mm) apresentam maior rigidez, como é o caso do DCB3, DCB6 e DCB8, relativamente aos restantes, caracterizados por $a_0 = 48\text{ mm}$ (ver Tabela 4.5). Existem dois valores distintos para a_0 , uma vez que foram usados dois tipo de dobradiças com diferentes dimensões. Dentro de cada “grupo” de curvas, os valores de rigidez inicial são praticamente iguais, o que revela a qualidade do fabrico dos provetes.

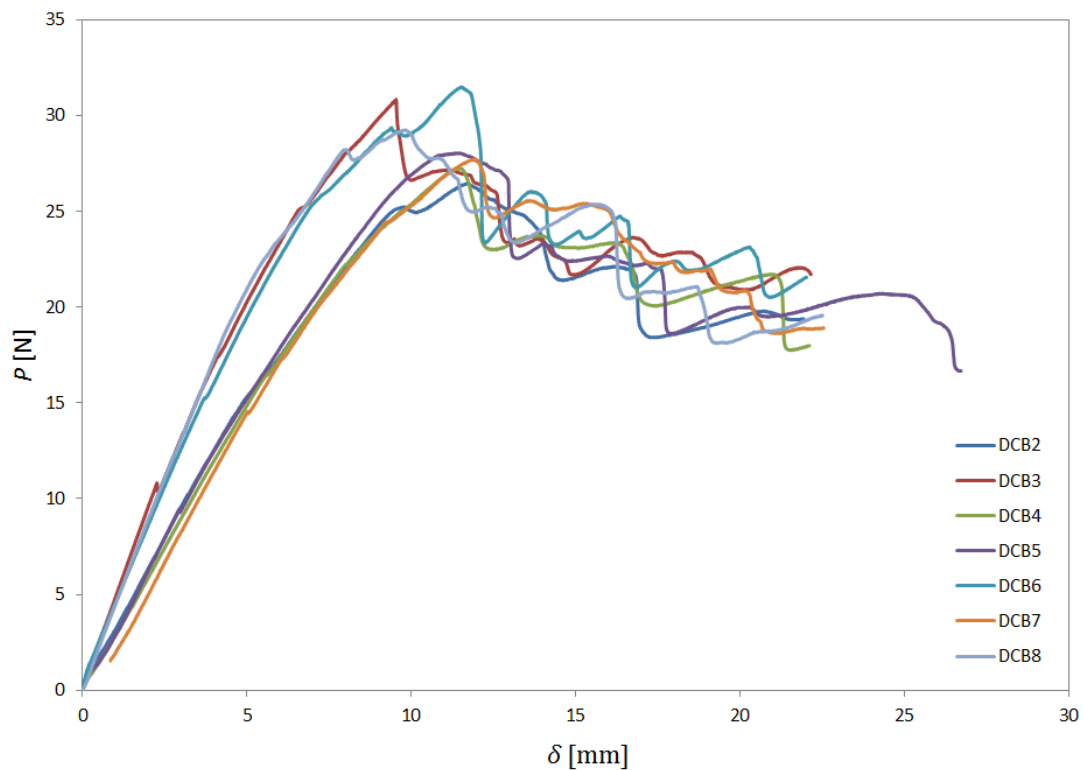


Figura 5.6 – Curvas P - δ dos provetes DCB.

Analisando as curvas apresentadas, verifica-se que à medida que o valor da carga aplicada aumenta, o deslocamento medido aumenta também (regime elástico). Um pouco antes de $P_{\text{máx}}$ (força máxima), verifica-se o aparecimento de alguma não linearidade correspondente à formação da ZPF. Na vizinhança de $P_{\text{máx}}$, a energia armazenada no provete atinge o seu valor crítico, G_{ic} , correspondente ao início de propagação da pré-fenda. A partir deste momento inicia-se um regime de propagação estável da fenda, caracterizado por uma diminuição progressiva da carga com o aumento do deslocamento medido. Durante o período de propagação a curva P - δ apresenta uma forma ondulada. Após cada pico de onda, há propagação da fenda. Este fenómeno é conhecido como “*stick-slip*”. A justificação para a ocorrência deste fenómeno é o aparecimento de micro-fendas sucessivas que se propagam apenas a uma curta distância, originando uma ligeira diminuição da força. Subsequentemente, o surgimento de novas micro-fendas decorre de forma gradual correspondendo a um aumento da força, e assim sucessivamente.

Em todos os ensaios ocorreu rotura coesiva pela cortiça, podendo mesmo considerar-se que a propagação ocorreu pelo plano médio do provete (ver Figuras 5.7, 5.8 e 5.9). O facto de a rotura ter sido coesiva demonstra a excelente adesão e impregnação que

ocorreu durante o processo de fabrico. Devido à simetria material e geométrica verificada, pode-se considerar que o ensaio ocorreu em puro modo I.

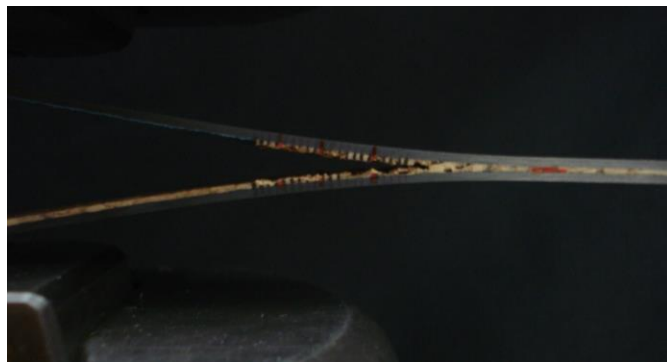


Figura 5.7 – Propagação da fenda durante o ensaio DCB do provete 8.



Figura 5.8 – Detalhe da zona de propagação da fenda no provete DCB8 – rotura coesiva pela cortiça.

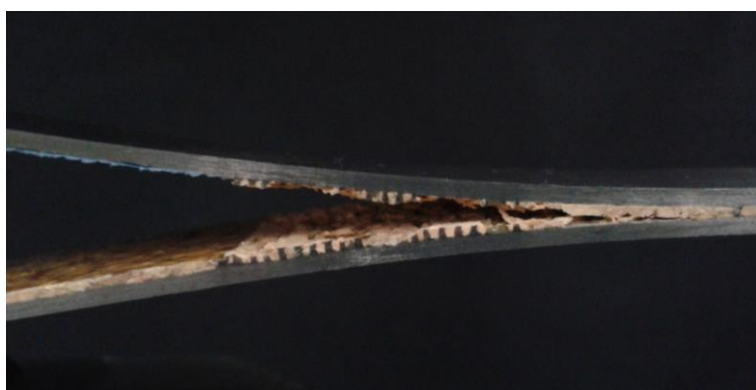


Figura 5.9 – Zona de propagação da fenda no provete DCB2 – rotura coesiva pela cortiça.

Durante a realização dos ensaios também se constatou a impossibilidade de fazer uma correta leitura do comprimento de fenda. À medida que o ensaio decorria, não era bem visível a frente de fenda.

5.2.1.2 CURVAS DE RESISTÊNCIA

Nas Figuras 5.10 a 5.16 apresentam-se as curvas $P-\delta$ e as correspondentes curvas de resistência, também designadas por curvas-R ($G_I = f(a_{eq})$), obtidas a partir do método CBBM apresentado no Capítulo 3. Foram consideradas as curvas referentes à flexão e à flexão-corte para se aquilatar da influência do corte na formulação.

De referir que o parâmetro Δ , que surge no CBBM, foi determinado numericamente, tendo sido necessário obter uma curva $P-\delta$ numérica que reproduzisse a mesma rigidez inicial da curva $P-\delta$ experimental de cada ensaio.

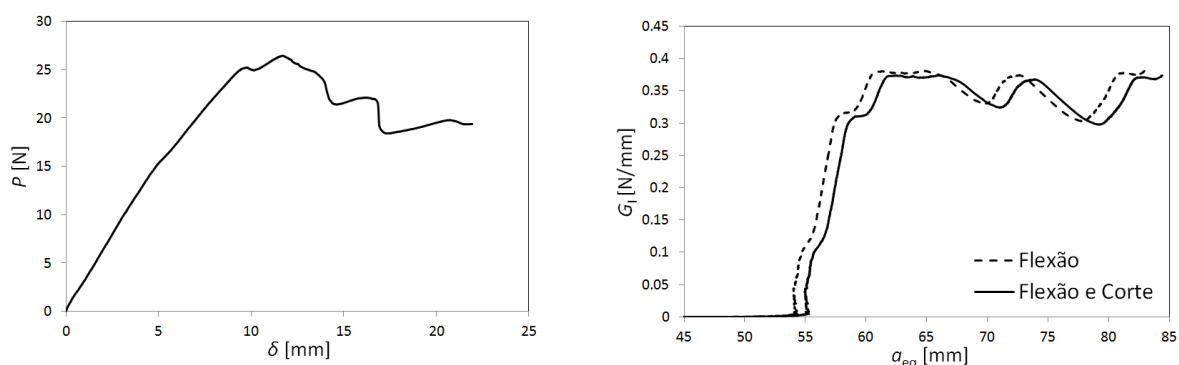


Figura 5.10 - Curva $P-\delta$ experimental e a respetiva curva-R do provete DCB2.

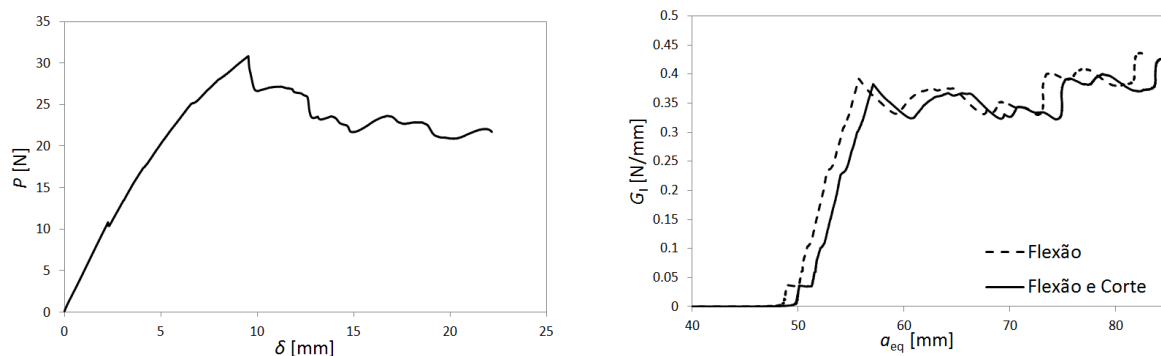


Figura 5.11 - Curva $P-\delta$ experimental e a respetiva curva-R do provete DCB3.

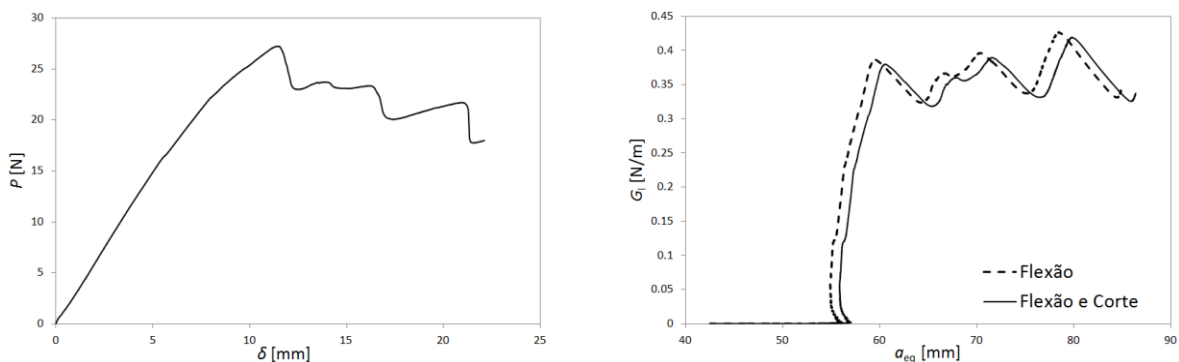


Figura 5.12 - Curva $P-\delta$ experimental e a respetiva curva-R do provete DCB4.

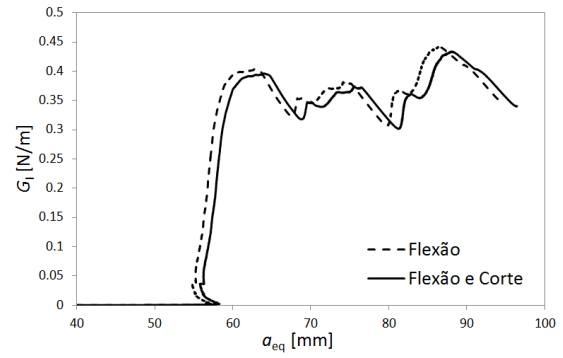
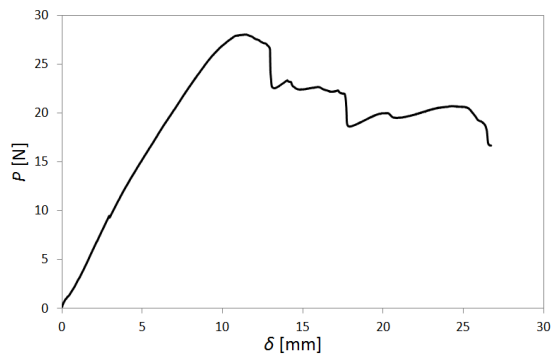


Figura 5.13 - Curva P - δ experimental e a respetiva curva-R do provete DCB5.

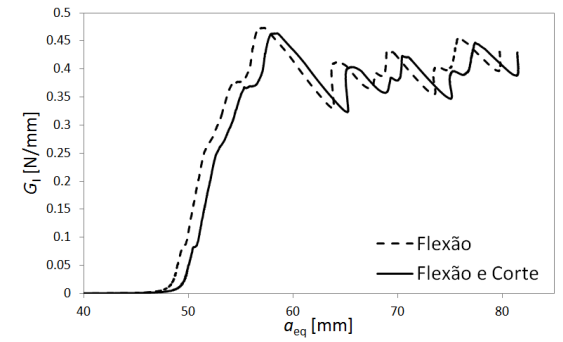
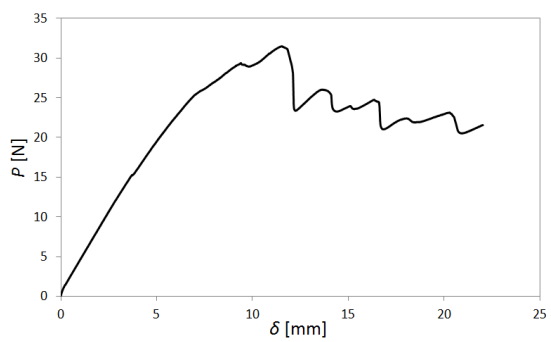


Figura 5.14 - Curva P - δ experimental e a respetiva curva-R do provete DCB6.

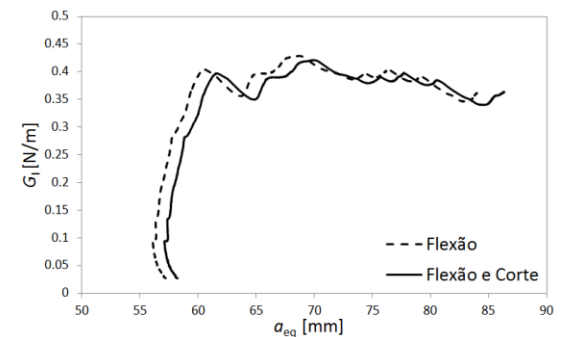
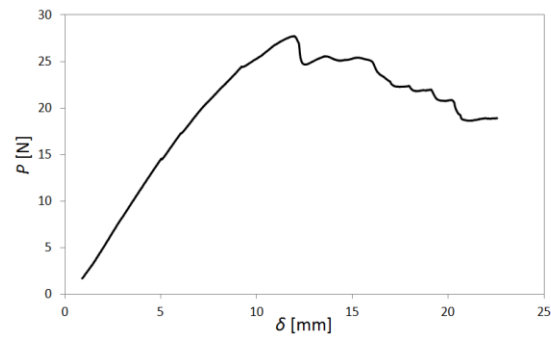


Figura 5.15 - Curva P - δ experimental e a respetiva curva-R do provete DCB7.

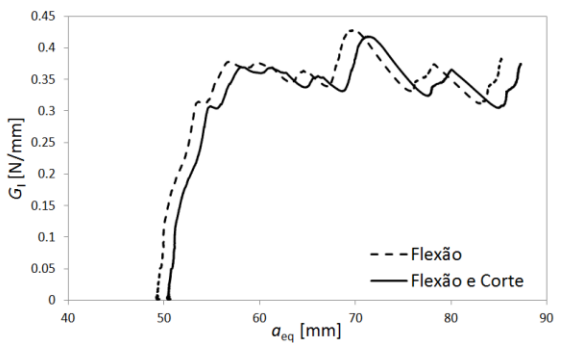
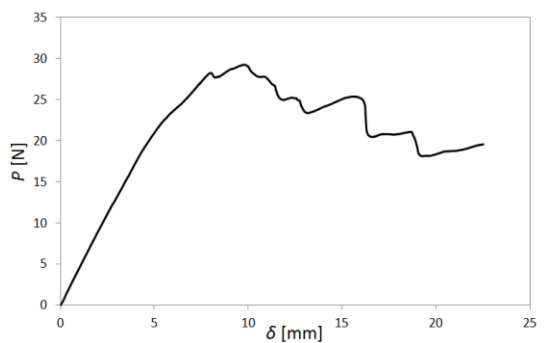


Figura 5.16 - Curva P - δ experimental e a respetiva curva-R do provete DCB8.

Nas curvas-R de cada provete DCB, é possível observar uma linha referente à flexão e corte, e outra referente apenas à flexão. Estas foram obtidas recorrendo às equações (18) e (5), respetivamente. Na verdade, para chegar à expressão de $G_I^{\text{flexão}}$ foi necessário substituir a equação (5) na (1). Assim, pela sua análise, verifica-se que os efeitos devidos ao corte não são relevantes, podendo ser desprezados.

De um modo geral, todas as curvas-R apresentam uma zona inicial, onde se verifica um aumento do valor da energia de fratura, para valores crescentes de a_{eq} . Nesta zona, os provetes encontram-se em regime elástico. A partir do momento em que surge dano (desenvolvimento da ZPF) que se reflete na não linearidade da curva $P-\delta$ (variação de C), ocorre variação de a_{eq} , até que a energia armazenada no provete atinge um valor crítico necessário para iniciar a propagação da fenda. Nesta zona, as curvas apresentam pequenas flutuações dos valores de G_I , devidas ao fenómeno de “*stick-slip*” descrito anteriormente nas curvas $P-\delta$.

É de referir que, à partida, o maior pico registado nas curvas $P-\delta$ é provavelmente espúrio e é resultado do efeito “*blunt*” provocado pela pré-fenda iniciada pelo filme de Teflon. De facto, o filme apresenta um raio de curvatura finito, o que requer uma maior quantidade de energia para que se inicie a propagação.

Os resultados que se apresentam na Tabela 5.1 para a energia de crítica de fratura em modo I são valores médios obtidos a partir das curvas-R experimentais acima representadas. Pela sua análise, constata-se que a variação entre eles é pequena (COV=4,2 %).

Tabela 5.1 – Valores médios da energia crítica de fratura em modo I dos provetes DCB.

Proвете	DCB2	DCB3	DCB4	DCB5	DCB6	DCB7	DCB8
G_{Ic} [N/mm]	0,343	0,355	0,354	0,364	0,387	0,374	0,349
Média		0,361					
COV (%)		4,2					

Na referência [25] é apresentado um valor para G_{Ic} de 0,273 N/mm, referente a um compósito constituído por 24 camadas de C-E unidireccionais $[0^\circ]$, tendo sido usado o mesmo processo de iniciação de fenda. Este valor é bastante inferior aos obtidos experimentalmente, o que, por comparação, demonstra a boa tenacidade da cortiça. Efetivamente, durante a deformação “plástica” da cortiça são absorvidas elevadas quantidades de energia, o que se traduz no aumento da resistência à fratura deste material. Assim, a propagação de fendas ocorre para valores de G_{Ic} superiores aos verificados em compósitos constituídos somente por C-E, o que se repercute num aumento de tenacidade interlaminar destes materiais.

5.2.2 ENSAIOS ENF

5.2.2.1 CURVAS FORÇA-DESLOCAMENTO

Durante os ensaios ENF foram registados os valores de força e de deslocamento, obtendo-se assim as curvas $P-\delta$. Nas Figuras 5.17 a 5.19 seguintes são apresentadas todas as curvas $P-\delta$ experimentais. Estas diferem entre si nos valores considerados para o comprimento de fenda inicial, a_0 , e para o comprimento entre os apoios, $2L$.

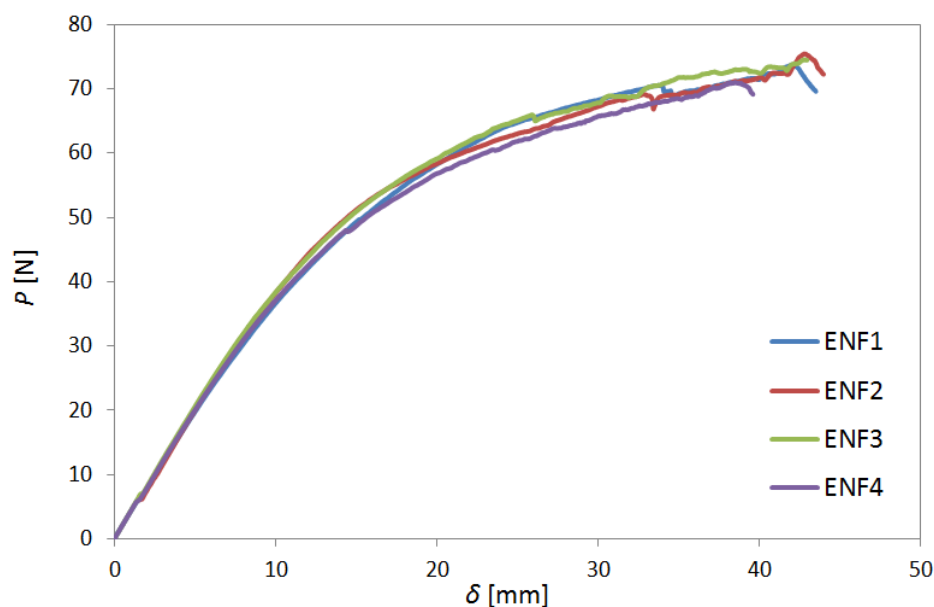


Figura 5.17 – Curvas $P-\delta$ dos provetes ENF1, ENF2, ENF3 e ENF4 ($a_0 = 102\text{mm}$, $2L = 280\text{mm}$).

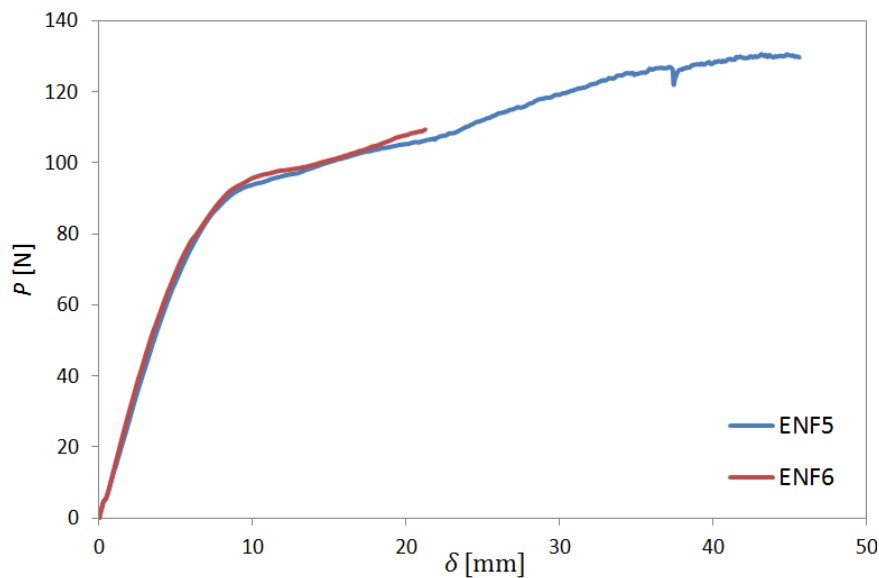


Figura 5.18 - Curvas P - δ dos provetes ENF5 e ENF6 ($a_0 = 50\text{mm}$, $2L = 200\text{mm}$).

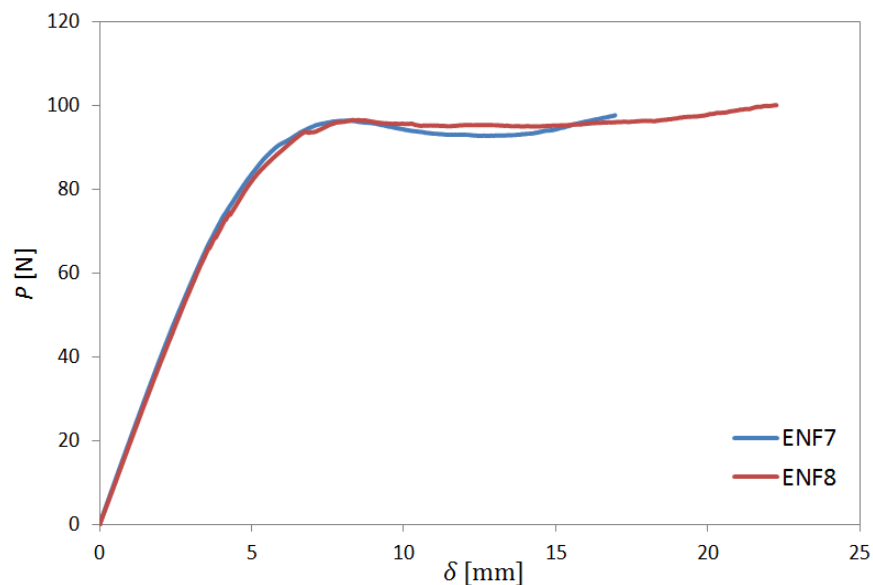


Figura 5.19 - Curvas P - δ dos provetes ENF7 e ENF8 ($a_0 = 40\text{mm}$, $2L = 200\text{mm}$).

Pela análise das Figuras 5.17 e 5.18, constata-se que as curvas P - δ apresentam uma tendência sempre crescente, que impossibilita a identificação da zona de início de fratura. Por este motivo, a nossa atenção focar-se-á principalmente na análise das curvas P - δ da Figura 5.19, referentes aos provetes ENF7 e ENF8. Nestas curvas, verifica-se a existência de uma fase inicial de crescimento, devida à acumulação de energia no provete pela deformação que lhe é imposta. Esta fase ocorre até se atingir um máximo, em cuja vizinhança a energia acumulada atinge o seu valor crítico, G_{Ic} , assinalando assim o início da propagação da pré-fenda. Consequentemente ocorre uma ligeira

relaxação da carga aplicada. O posterior aumento da carga pode ser devido ao efeito compressivo do apoio central no provete (ver Figura 3.10), o qual afeta a zona de processo de fratura e leva ao aumento da resistência à propagação da fenda, e consequentemente impede a sua propagação livre. Por essa razão, os provetes foram ensaiados considerando vários valores de a_0 e de $2L$. Contudo, em nenhum deles se conseguiu eliminar completamente esse efeito, embora se note nas curvas $P-\delta$ uma evolução no sentido da existência de um patamar com a diminuição de a_0 (ver Figuras 5.18 e 5.19). Tal seria eventualmente possível considerando valores inferiores para a_0 ou superiores para $2L$. A consequência deste efeito espúrio na curva-R será o aumento contínuo de G_{II} . Além disso, o aumento de carga após a relaxação também poderá estar relacionado com o comportamento da cortiça durante o ensaio. Esta parte será desenvolvida mais à frente, na discussão das superfícies de fratura.

Pela análise das superfícies de fratura, pode-se considerar que a propagação ocorreu pelo plano médio do provete (ver Figuras 5.20 e 5.22). Devido à simetria material e geométrica verificada, pode-se considerar que o ensaio ocorreu em puro modo II.



Figura 5.20 – Provete ENF2 durante o ensaio – propagação da fenda já é visível.

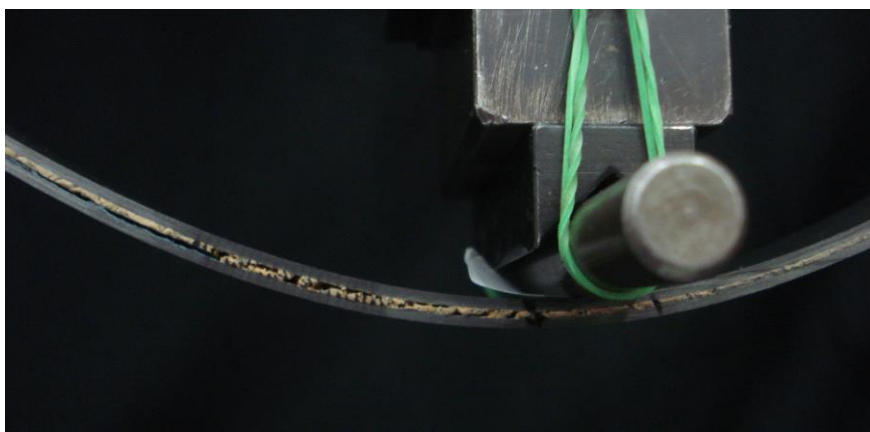


Figura 5.21 – Provete ENF5 durante o ensaio.

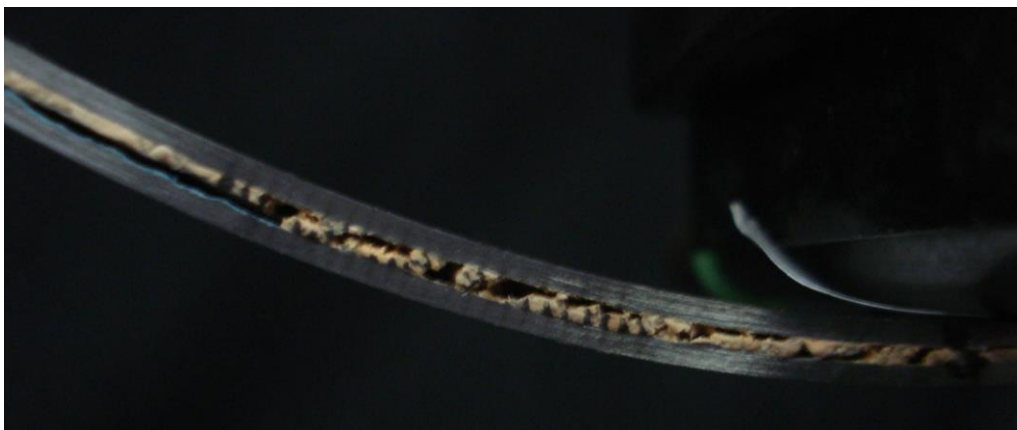


Figura 5.22 – Detalhe da zona de propagação da fenda – provete ENF5.

Tal como ocorreu nos ensaios DCB, também nos ENF não foi possível fazer uma correta leitura do comprimento de fenda, circunstância agravada pelo facto da carga compressiva exercida provocar o contacto entre as duas faces.

Associado ao comprimento inicial de fenda, existe um problema típico de propagação instável no ensaio ENF. De modo a evitar esta situação, deve-se considerar $a_0 \geq 0,7L$. [32]. No entanto, nos provetes ensaiados, não foi respeitada esta condição e mesmo assim não se verificou propagação instável, o que se explica pelas superfícies de fratura obtidas (ver detalhes na secção 5.2.3).

5.2.2.2 CURVAS DE RESISTÊNCIA

Nas Figuras 5.23 e 5.24 são apresentadas as curvas $P-\delta$ e as correspondentes curvas-R ($G_{II} = f(a_{eq})$) dos provetes ENF7 e ENF8, obtidas a partir do método CBBM apresentado no Capítulo 3. Foram consideradas as curvas referentes à flexão-corte e à flexão. Apenas são analisadas as curvas referentes aos provetes ENF7 e ENF8, uma vez são as únicas que apresentam um andamento próximo do desejado.

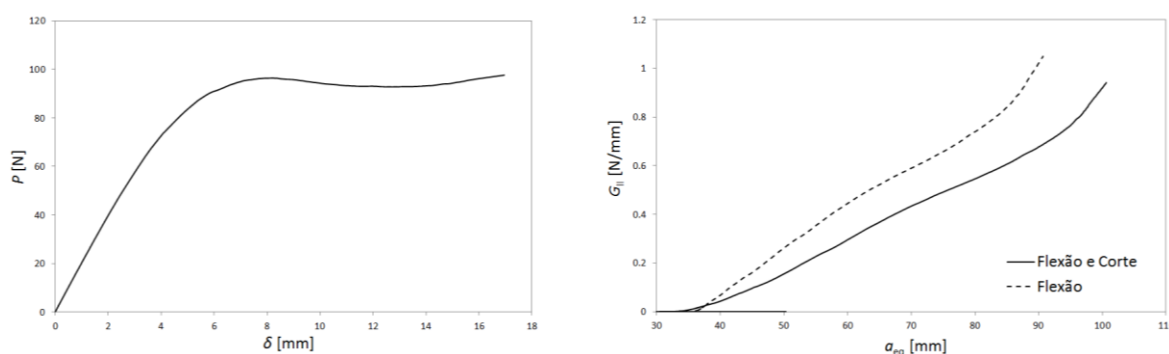
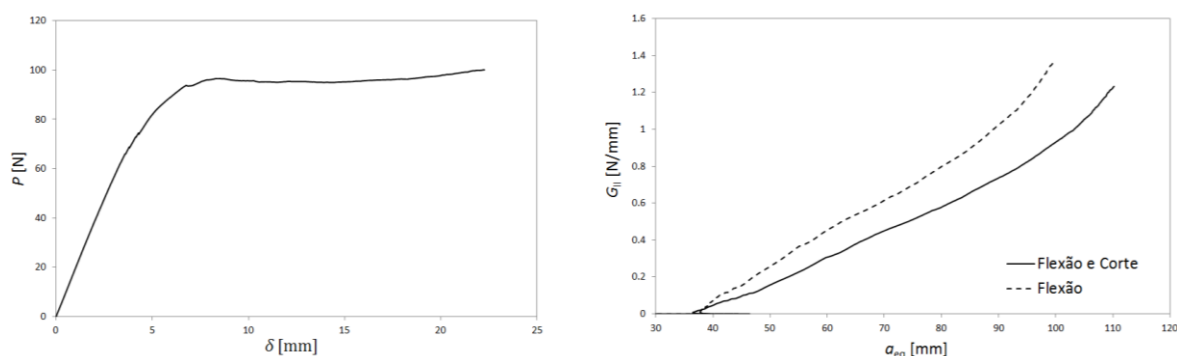


Figura 5.23 - Curva $P-\delta$ experimental e a respetiva curva-R do provete ENF7.


 Figura 5.24 - Curva P - δ experimental e a respetiva curva-R do provete ENF8.

Nas curvas-R de cada provete, é possível observar uma linha referente à flexão e corte, e outra referente apenas à flexão. Estas foram obtidas recorrendo às equações (37) e (25), respetivamente. Na verdade, para chegar à expressão de $G_I^{\text{flexão}}$ foi necessário substituir a equação (25) na (1). Assim, pela sua análise verifica-se que a fratura ocorre para menores valores de G_{II} considerando flexão e corte. Neste caso, tanto a flexão como o corte contribuem para a fratura, o que leva a que a propagação da fenda ocorra mais cedo, isto é, para menores valores de G_{II} .

As curvas-R apresentam uma tendência crescente contínua, não havendo a formação de um patamar indicador da zona de propagação auto-semelhante. Tal comportamento era esperado, uma vez que não se conseguiu eliminar por completo o efeito compressivo do apoio central. Contudo, este comportamento também poderá ter resultado da interação entre as superfícies de fratura, como será explicado a seguir.

Tabela 5.2 – Valores da energia crítica de fratura em modo II dos provetes ENF7 e ENF8.

Proвете	G_{IIc} [N/mm]
ENF7	0,50-0,53
ENF8	0,52-0,55
Média	0,525
COV (%)	2,7

Os resultados que se apresentam na Tabela 5.2 para a energia crítica de fratura em modo II são valores correspondentes à zona após a ocorrência do $P_{\text{máx}}$ nas curvas P - δ

experimentais. Pela sua análise constata-se que a variação entre eles é pequena ($COV=2,7\%$). Caso mais ensaios tivessem apresentado curvas $P-\delta$ aceitáveis, poder-se-ia conhecer mais corretamente a gama de variação do G_{IIc} .

Na referência [33] é apresentado um valor médio para G_{IIc} de 0,75 N/mm, referente a um compósito constituído por 24 camadas de C-E unidireccionais $[0^\circ]$, tendo sido usado o mesmo processo de iniciação de fenda. Este valor é superior aos obtidos experimentalmente neste trabalho. Todavia, o resultado apresentado nesta dissertação carece de confirmação, pois as condições do ensaio, como se viu, indiciam influência espúria do carregamento central. Além disso, devido ao andamento das curvas $P-\delta$ experimentais, é difícil saber com exatidão o ponto correspondente ao início da propagação da fenda. Consequentemente, os valores de G_{IIc} experimentais considerados podem não retratar com rigor a energia de fratura em modo II do compósito de C-E e cortiça.

5.2.3 ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA

Tal como referido anteriormente, verificou-se uma boa adesão entre a cortiça e o carbono, assim como uma boa impregnação da cortiça, o que originou roturas coesivas na cortiça. Nas figuras seguintes podem ser observadas as superfícies de fratura de vários provetes DCB e ENF. A partir da Figura 5.25 constata-se que o provete DCB apresenta na sua superfície um grande número de grânulos inteiros bem definidos, o que indica que a propagação da fenda ocorreu entre grânulos.



Figura 5.25 – Superfícies de fratura do provete DCB2.

No que respeita ao ensaio ENF (ver Figura 5.26) constata-se que os grânulos de cortiça tendem a orientar-se paralelamente à direção da tensão de corte, o que resulta do efeito do corte e do atrito entre as superfícies de fratura. Também se verifica a existência de bastantes grânulos inteiros nas duas faces de cada provete, o que mais uma vez indica que a propagação da fenda ocorreu entre grânulos. Este tipo de propagação pode ter resultado da descolagem de grânulos entre si, da rotura da interface resina/cortiça ou mesmo da rotura da própria resina. O mesmo foi relatado por *Soares et al.* [18].

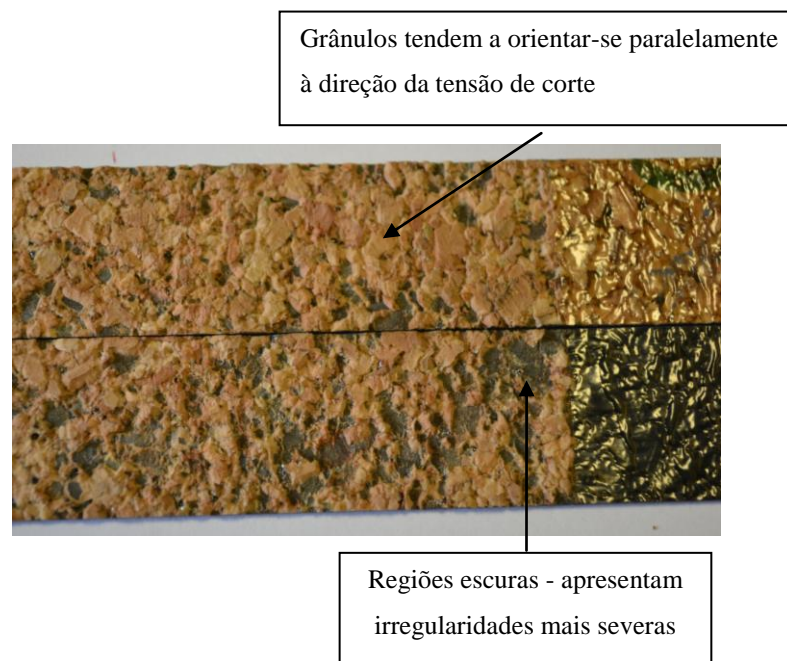


Figura 5.26 - Superfícies de fratura do Provete ENF1.



Figura 5.27 - Superfícies de fratura do Provete ENF8.

Comparando as superfícies de fratura dos provetes ENF com as do provete DCB, verifica-se a existência de um número mais elevado de regiões mais escuras (ver Figuras 5.26 e 5.27). Estas regiões apresentam irregularidades (“picos” e “vales”) mais severas do que as restantes, que durante o ensaio provocam um aumento significativo

do atrito entre as duas superfícies em contacto, traduzindo-se num aumento da resistência à propagação da fenda. Assim, pode-se concluir que o contínuo aumento de G_{II} pode resultar do efeito da carga compressiva do apoio central e/ou do efeito do elevado atrito que ocorre na superfície de fratura.

6 ANÁLISE NUMÉRICA

Com recurso ao software ABAQUS® (versão 6.11) procedeu-se à simulação dos provetes DCB e ENF para a validação da metodologia proposta. Foram construídos modelos numéricos utilizando elementos finitos planos quadráticos de oito nós (estado plano de tensão) e elementos de interface de seis nós, com o objetivo de simular a iniciação e propagação da fenda. Os elementos finitos de interface foram introduzidos no modelo numérico através de uma USER-SUBROUTINE programada em ambiente FORTRAN, reproduzindo o modelo de dano, de acordo com a lei coesiva triangular apresentada na Figura 6.1 [34]. Nas simulações realizadas considerou-se o modelo de dano em modo-misto I+II para contemplar a eventual influência de alguma presença de modo misto nas situações estudadas.

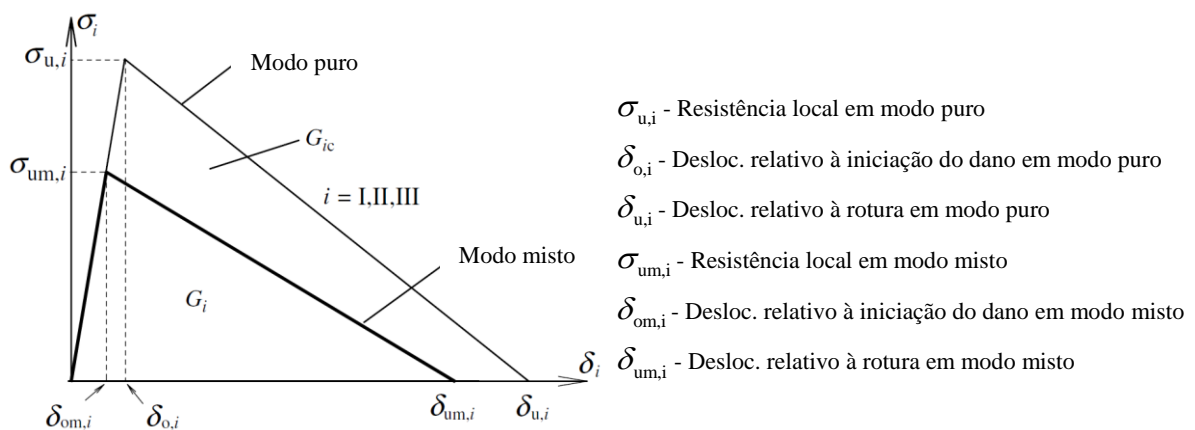


Figura 6.1 – Modelo de dano em modo puro e em modo misto (I+II) [34].

Na malha de elementos finitos foram usados diferentes graus de refinamento, tendo sido mais refinada a zona correspondente à propagação da fenda (ver Figura 6.2). Os elementos sólidos simulam as camadas de carbono e cortiça. Os elementos de interface possuem espessura nula e foram posicionados ao longo do plano médio do provete (metade da espessura da camada de cortiça), de forma a simular o que ocorreu nos ensaios experimentais.

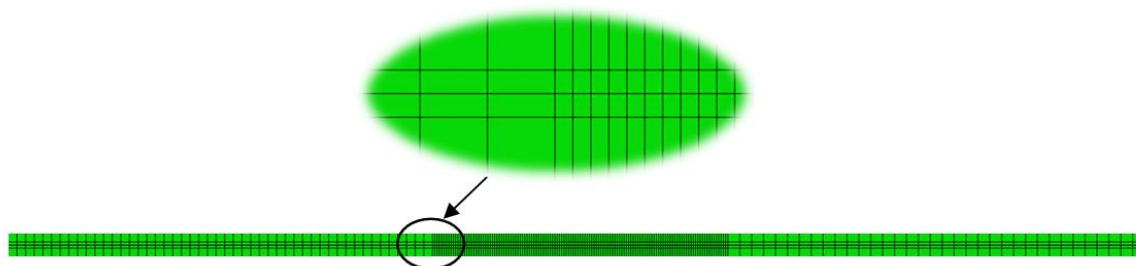


Figura 6.2 – Malha de elementos finitos.

A malha utilizada para definir a geometria DCB é constituída por 1272 elementos, dos quais 1060 são elementos sólidos e 212 são elementos de interface. Na Figura 6.3 é apresentada a malha de elementos finitos do provete DCB com as respectivas condições de fronteira.

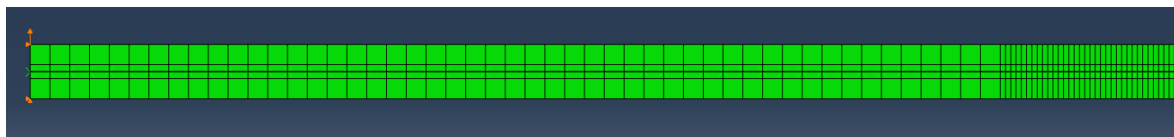


Figura 6.3 – Detalhe da malha do provete DCB ilustrando as condições de fronteira.

A malha utilizada para definir a geometria ENF também é constituída por 1272 elementos, dos quais 1060 são elementos sólidos e 212 são elementos de interface. Na Figura 6.4 é apresentada a malha de elementos finitos do provete ENF com as respectivas condições de fronteira.



Figura 6.4 – Provete ENF ilustrando as condições de fronteira.

As propriedades mecânicas do C-E e da cortiça usadas nas simulações estão especificadas nas tabelas apresentadas na secção 4.1. O módulo E_1 do C-E, foi ajustado para cada provete, de forma a obter a melhor aproximação entre as curvas numéricas e experimentais. Os valores de G_{Ic} inseridos no modelo numérico foram os obtidos

experimentalmente para cada provete (ver Tabela 5.1), enquanto que os de G_{IIc} foram ajustados num processo iterativo de modo a obter bom acordo entre as curvas $P-\delta$ numérica e experimental. Das simulações foram obtidos os valores de força e de deslocamento. Aplicando a metodologia CBBM, detalhada no Capítulo 3, foi possível chegar às curvas de resistência numéricas. Por fim, é importante referir que esta análise apenas foi feita para os provetes da placa 2.

6.1 VALIDAÇÃO DO MÉTODO

Com o intuito de validar o método numérico, foram feitas duas simulações – uma referente ao provete DCB e outra referente ao provete ENF. Com os resultados obtidos traçou-se a curva $P-\delta$ de cada ensaio. A partir destas e aplicando o método CBBM, obtiveram-se as curvas-R (ver Figuras 6.5 e 6.6). Nas simulações foi assumido $G_{Ic} = 0,34$ [N/mm] e $G_{IIc} = 0,4$ [N/mm].

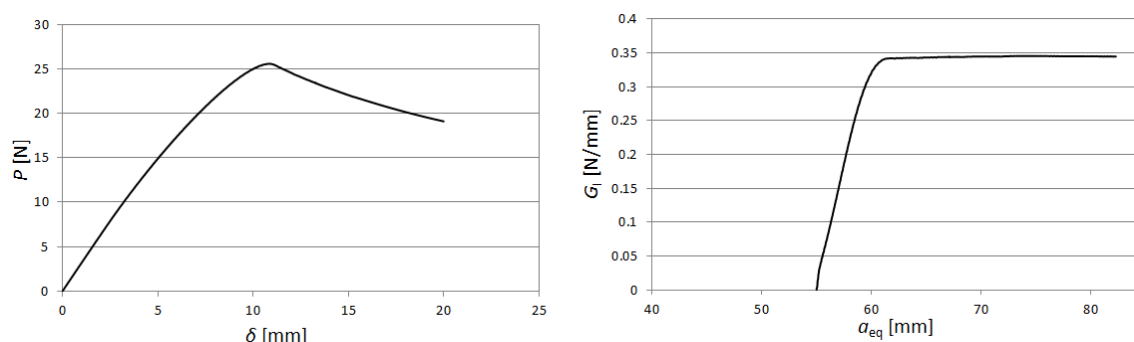


Figura 6.5 – Curva $P-\delta$ numérica e a respetiva curva-R - DCB.

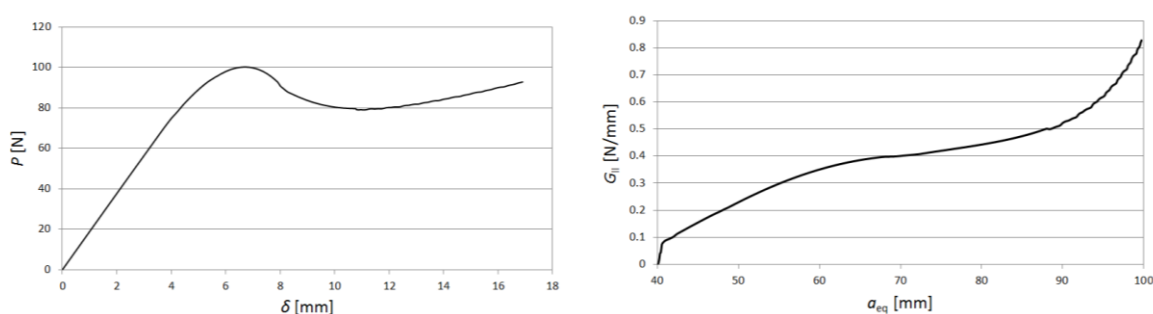


Figura 6.6 - Curva $P-\delta$ numérica e a respetiva curva-R - ENF.

Constata-se que a curva-R referente ao ensaio DCB tende para 0,34, ou seja, para o valor de entrada da energia crítica de fratura. Em relação ao ENF, verifica-se que na zona central da respetiva curva-R existe um pequeno patamar para $G_{II} = 0,4$ [N/mm].

Esta concordância entre os valores de G_c de entrada e a tendência das curvas-R é suficiente para validar o procedimento proposto.

6.2 ENSAIOS DCB

Nas Figuras 6.7 a 6.13 comparam-se as curvas P - δ numéricas e experimentais, bem como as curvas-R para todos os provetes DCB. Pela sua análise, verifica-se que, em geral, as curvas obtidas numericamente reproduzem bastante bem as curvas experimentais.

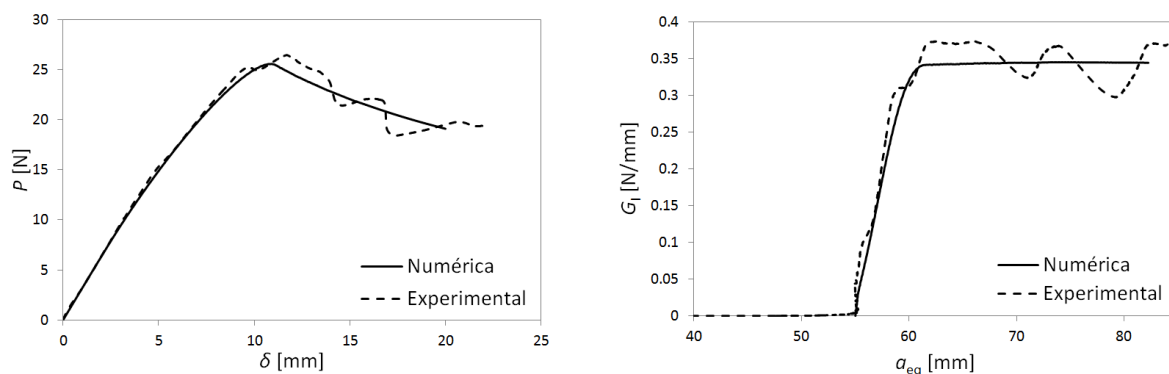


Figura 6.7 - Comparação entre as curvas P - δ numérica e experimental e respetivas curvas-R para o provete DCB2.

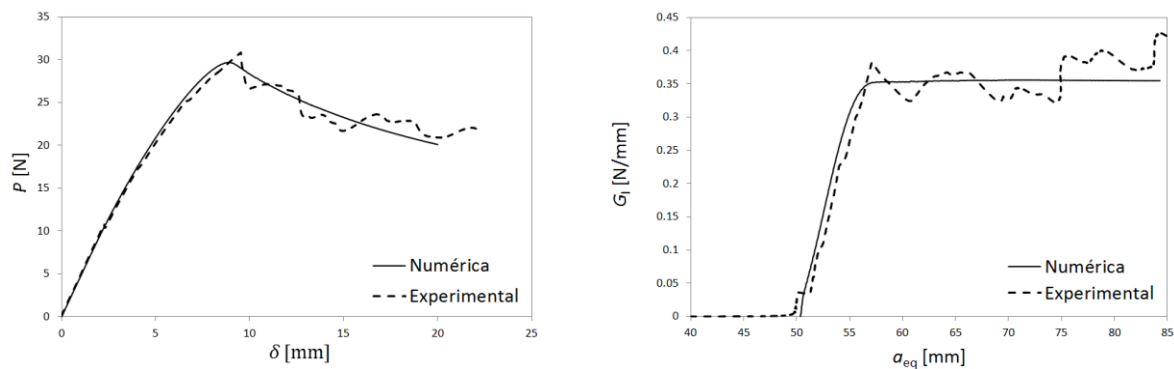


Figura 6.8 - Comparação entre as curvas P - δ numérica e experimental e respetivas curvas-R para o provete DCB3.

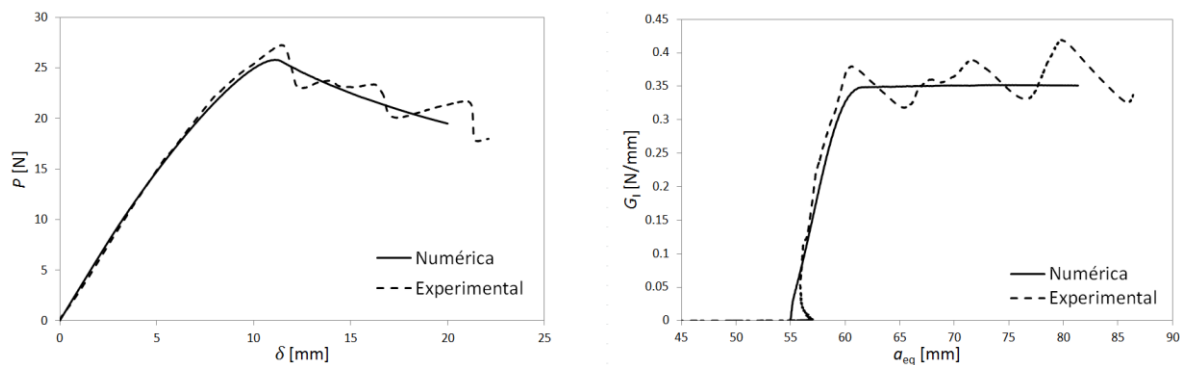


Figura 6.9 - Comparação entre as curvas P - δ numérica e experimental e respetivas curvas-R para o provete DCB4.

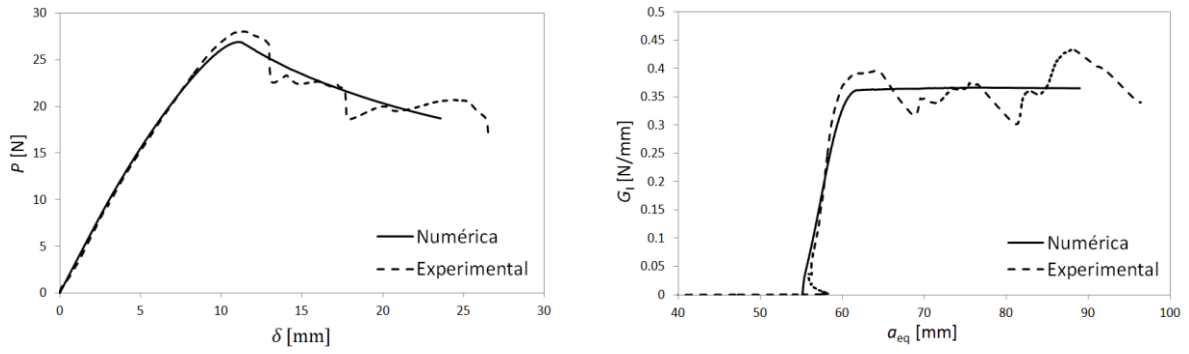


Figura 6.10 - Comparação entre as curvas P - δ numérica e experimental e respectivas curvas-R para o provete DCB5.

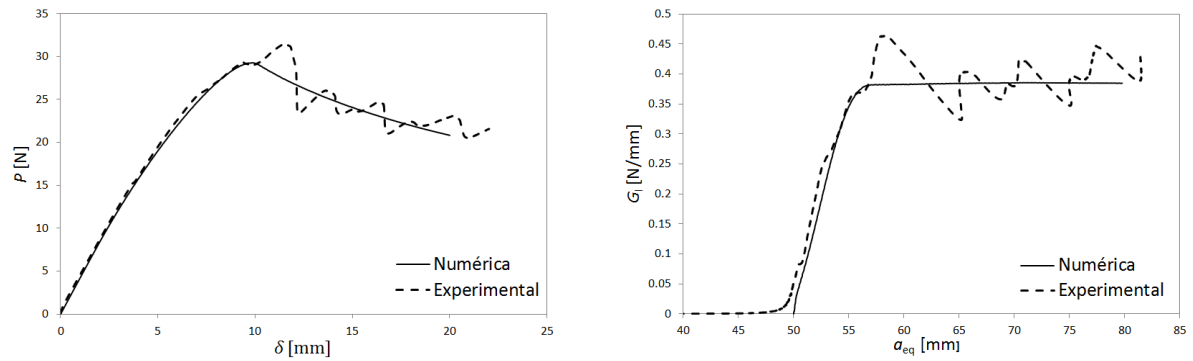


Figura 6.11 - Comparação entre as curvas P - δ numérica e experimental e respectivas curvas-R para o provete DCB6.

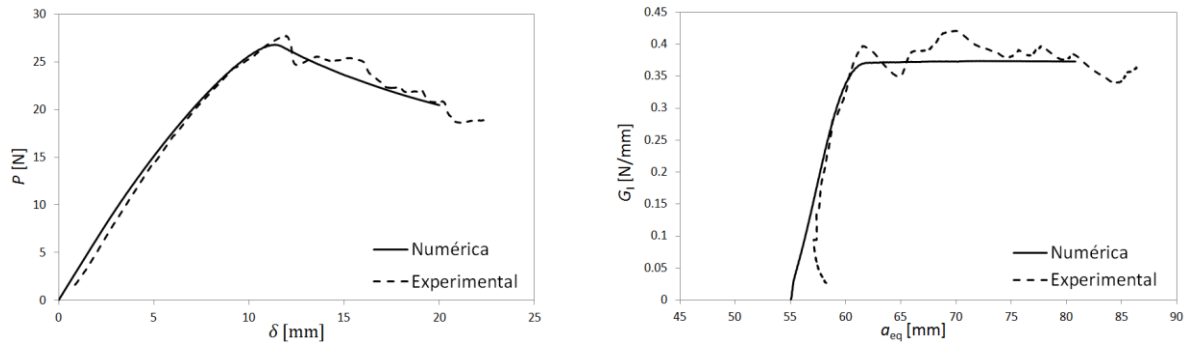


Figura 6.12 - Comparação entre as curvas P - δ numérica e experimental e respectivas curvas-R para o provete DCB7.

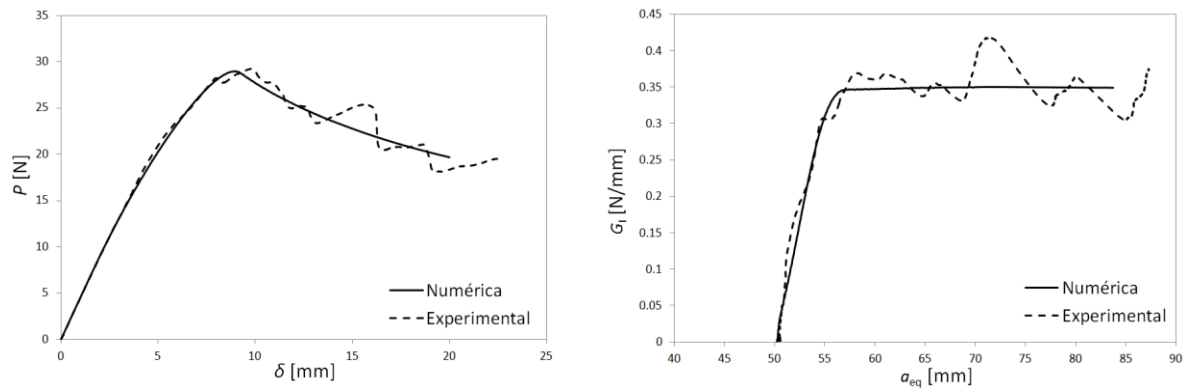


Figura 6.13 - Comparação entre as curvas P - δ numérica e experimental e respectivas curvas-R para o provete DCB8.

As curvas-R apresentadas contabilizam os efeitos de flexão e corte. Tanto as curvas $P-\delta$, como as curvas-R numéricas de cada provete, acompanham o andamento das respectivas curvas experimentais. Nas curvas de resistência numéricas, surge um patamar bem definido na zona correspondente à propagação da fenda.

Na Tabela 6.1 são apresentados os valores de alguns dos parâmetros definidos na simulação. Para a cortiça, foi sempre considerado $E_c = 41 \text{ MPa}$ e $G = 23 \text{ MPa}$. Em relação aos a_0 , procurou-se definir valores próximos dos medidos em cada provete, enquanto que para G_{Ic} usaram-se os valores médios obtidos a partir das curvas-R experimentais. Considerou-se $\sigma_{u,I} = 1 \text{ MPa}$. Tal como seria de esperar, o patamar obtido para cada curva-R numérica tende para o valor de entrada G_{Ic} considerado. De forma, a conseguir aproximar a rigidez inicial das curvas $P-\delta$, foi necessário acertar o módulo de Young E_1 (correspondente ao laminado de carbono) para cada situação, uma vez que é o parâmetro que mais influência tem na rigidez. Daí, serem apresentados diferentes valores de E_1 para cada provete.

Tabela 6.1 – Valores dos parâmetros usados nas simulações.

Proвете	a_0 [mm]	G_{Ic} [N/mm]	E_1 [GPa]
DCB2	48,1	0,343	129
DCB3	43,0	0,355	143,3
DCB4	48,1	0,354	127,5
DCB5	48,1	0,364	135,5
DCB6	43,0	0,387	127
DCB7	48,1	0,374	131
DCB8	43,0	0,349	138

Finalmente, verifica-se que existe uma excelente concordância entre os valores de G_{Ic} experimentais e os obtidos nas curvas-R numéricas (ver Tabela 6.2). Os $G_{Ic}^{\text{numérico}}$

apresentados correspondem aos valores para os quais as curvas-R numéricas tendem em cada provete.

Tabela 6.2 – Comparação entre os valores experimentais e numéricos de G_{Ic} .

Provete	DCB2	DCB3	DCB4	DCB5	DCB6	DCB7	DCB8
G_{Ic}	0,343	0,355	0,354	0,364	0,387	0,374	0,349
$G_{Ic}^{numérico}$	0,345	0,355	0,351	0,365	0,384	0,373	0,349
Erro (%)	0,58	0	-0,85	0,27	-0,78	-0,27	0

6.3 ENSAIOS ENF

Nas Figuras 6.14 e 6.15 comparam-se as curvas P - δ numéricas e experimentais, bem como as curvas-R para os provetes ENF7 e ENF8. Pela sua análise, verifica-se que as curvas obtidas numericamente reproduzem bastante bem as curvas experimentais.

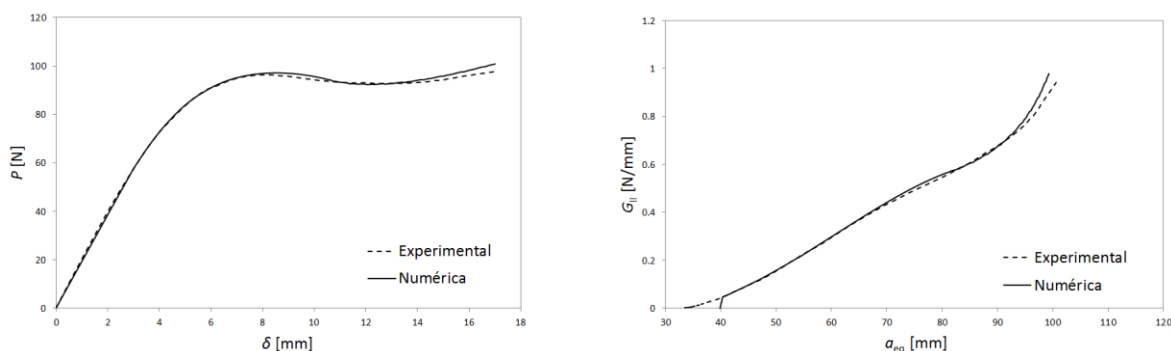


Figura 6.14 - Comparação entre as curvas P - δ numérica e experimental e respetivas curvas-R para o provete ENF7.

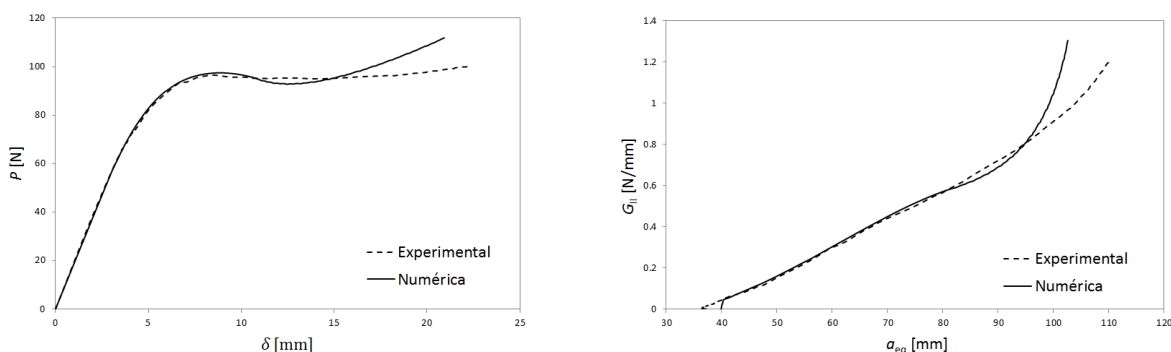


Figura 6.15 - Comparação entre as curvas P - δ numérica e experimental e respetivas curvas-R para o provete ENF8.

As curvas-R apresentadas contabilizam os efeitos de flexão e de corte. Tanto as curvas $P-\delta$, como as curvas-R numéricas, acompanham o andamento das respectivas curvas experimentais.

Na Tabela 6.3 são apresentados os valores de alguns dos parâmetros definidos na simulação. Para a cortiça, foi sempre considerado $E_c = 41 \text{ MPa}$ e $G = 23 \text{ MPa}$. Tal como foi feito na simulação dos ensaios DCB, procurou-se definir um valor de a_0 próximo do definido no ensaio experimental. De forma, a conseguir aproximar a rigidez inicial das curvas $P-\delta$, foi necessário acertar o módulo de Young E_1 para cada situação, uma vez que é o parâmetro que mais influência tem na rigidez. Daí, serem apresentados diferentes valores de E_1 para cada provete. Os valores de G_{IIc} e $\sigma_{u,II}$ foram ajustados num processo iterativo de modo a obter bom acordo entre as curvas $P-\delta$ numérica e experimental. Pode-se constatar que as curvas-R numéricas acompanham o andamento das correspondentes curvas experimentais, havendo boa concordância entre elas. Este resultado permite estimar de forma indireta o valor de G_{IIc} de cada provete e, de algum modo, indicia que o comportamento verificado nas curvas $P-\delta$ pode estar relacionado com o efeito espúrio da compressão do carregamento central, uma vez que o outro fenómeno (atrito nas superfícies de fratura) não é contemplado na simulação. Fica assim reforçada a necessidade de novos ensaios em que a distância entre a extremidade da fenda e o ponto central de carregamento seja superior aos usados neste trabalho.

Tabela 6.3 – Valores dos parâmetros usados nas simulações.

Provete	a_0 [mm]	G_{IIc} [N/mm]	$\sigma_{u,II}$ [MPa]	E_1 [GPa]
ENF7	39,8	0,495	2,35	149
ENF8	39,8	0,517	2,35	144

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho procedeu-se ao desenvolvimento de um material compósito, constituído por C-E e cortiça, tendo como objetivo principal caracterizar o seu comportamento à fratura em modo I e em modo II. Neste contexto, recorreu-se aos ensaios *Double Cantilever Beam* (DCB) e *End-Notched Flexure* (ENF) que propiciam, respetivamente, sollicitações em modo I e II na extremidade da fenda. Durante os ensaios experimentais, foram registados dois parâmetros: a força e o deslocamento aplicados. A determinação da evolução das energias de fratura durante o ensaio foi realizada recorrendo a um método baseado no conceito de fenda equivalente e que depende apenas da flexibilidade do provete ($G_I = f(a_{eq})$ e $G_{II} = f(a_{eq})$), denominado por *Compliance Based Beam Method* (CBBM). Este método apresenta a vantagem de não requerer a monitorização do comprimento de fenda durante o ensaio e de incluir o efeito da zona de processo de fratura.

Inicialmente começou-se por produzir uma placa compósita constituída por camadas alternadas de cortiça e C-E. No entanto, após a constatação do fracasso de alguns ensaios, chegou-se à conclusão que o elevado teor de cortiça sacrificou em demasia a rigidez do laminado. Este facto associado a uma resistência à fratura da cortiça superior ao esperado levou ao aparecimento precoce de falhas.

De forma a superar o sucedido, foi produzida uma nova placa contendo apenas uma camada de cortiça, na qual se apostou num aumento da rigidez global, através da introdução de mais camadas de C-E. Dos ensaios DCB realizados, concluiu-se que a

propagação da fenda foi estável e que ocorreu pela cortiça, o que levou a roturas coesivas. O valor de G_{Ic} médio obtido foi de 0,361 N/mm, o que se revelou superior ao obtido em provetes constituídos apenas por C-E, traduzindo-se num aumento da tenacidade interlaminar. Por outro lado, da realização dos ensaios ENF, concluiu-se que a propagação da fenda ocorreu pelo plano médio do provete e que, apesar de os comprimentos iniciais não satisfazerem a condição $a_0 \geq 0,7L$, foi estável. O valor de G_{IIc} médio obtido, por método inverso, foi de 0,525 N/mm, o que se revelou inferior ao obtido em provetes constituídos apenas por C-E. Todavia, este resultado carece de confirmação, pois as condições do ensaio indiciam influência espúria do carregamento central. Por outro lado, verificou-se que o modo de propagação da fenda em modo II se alterou relativamente ao C-E, dado que se processa de forma gradual, mesmo para valores de comprimento de fenda inicial relativamente ao comprimento do provete, propiciadores de instabilidade. Esta alteração de modo de rotura é de um modo geral benéfica, dado que a propagação abrupta é indesejável nas estruturas. De forma a entender o que ocorreu durante os ensaios, procedeu-se à análise das superfícies de fratura. Verificou-se que ocorreu uma boa adesão entre a cortiça e o carbono, assim como uma boa impregnação da cortiça, o que originou roturas coesivas na cortiça. Da análise das superfícies de fratura dos provetes DCB e ENF conclui-se que a propagação da fenda ocorreu entre grânulos. Nos provetes ENF observou-se um número elevado de regiões mais escuras, correspondentes a irregularidades (“picos” e “vales”) mais severas, as quais provocaram um aumento significativo do atrito entre as duas superfícies em contacto, traduzindo-se num aumento espúrio da resistência à propagação da fenda.

De forma a validar o procedimento experimental, foi desenvolvido um modelo numérico. Nas simulações numéricas foram usados os valores médios de G_{Ic} e G_{IIc} obtidos nos ensaios experimentais. As curvas força-deslocamento e as curvas-R foram comparadas com as experimentais, tendo-se observado boa concordância entre elas. Estes resultados revelam que o método CBBM proposto é válido para a obtenção das curvas-R, não necessitando da monitorização do comprimento de fenda durante os ensaios, o que se mostrou uma tarefa de difícil realização, principalmente nos ensaios ENF devido ao facto da fenda se propagar com as faces em contacto, o que dificulta a identificação da sua extremidade.

8 PERSPETIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

A análise das curvas $P-\delta$ referentes aos ensaios ENF indicia que o efeito espúrio da carga compressiva do apoio central não foi completamente eliminado. No sentido de clarificar este aspeto e ultrapassar esta dificuldade, sugere-se para trabalhos futuros a realização de novos ensaios considerando menores valores para o comprimento de fenda inicial e/ou maiores valores para o comprimento L . Outro trabalho interessante poderá passar pela caracterização à fratura em modo misto I+II do compósito produzido neste trabalho.

Por outro lado, sugere-se para trabalho futuro a produção de novas placas considerando diferentes sequências de empilhamento, com mais camadas de cortiça, de forma a perceber como essa adição afeta o comportamento à fratura. É sabido que a delaminação é um dos aspetos críticos do comportamento mecânico dos materiais compósitos multi-direcionais. Neste sentido, seria interessante perceber até que ponto a introdução de folhas de cortiça entre camadas consecutivas de fibras diferentemente orientadas poderia levar a uma redução do fenómeno de delaminação.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Dias, "Comportamento ao Impacto a baixa velocidade de laminados de epóxico/fibra de vidro, com camadas de cortiça," Mestrado Integrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Porto, Porto, 2009.
- [2] M. F. S. F. de Moura, A. B. de Moraes, and A. G. d. Magalhães, *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportameto Mecânico*, 2ª Edição ed.: Publindústria, 2005.
- [3] T. J. Reinhart, W. S. Smith, J. T. Quinlivan, and G. Bourland, *Composites Volume 1* vol. 1. USA: ASM International, 1987.
- [4] M. M. Schwartz, *Composites Materials Handbook*. USA: Mc-Graw Hill Book Company, 1984.
- [5] Y. Yang, R. Boom, B. Irion, D.-J. v. Heerden, P. Kuiper, and H. d. Wit, "Recycling of composites materials," *Elsevier*, p. 16, 2011.
- [6] A. B. Strong, *Fundamentals of Composites Manufacturing - Materials, Methods and Applications*, Second Edition ed. USA: Society of Manufacturing Engineers, 2008.
- [7] B. A. R. S. Soares, "Estruturas Sandwich com Utilização de Núcleos de Cortiça," Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

- [8] P. M. R. Carvalho, "Análise do comportamento mecânico e identificação do tipo de falha em estruturas sandwich com núcleos de cortiça," Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.
- [9] P. M. G. Belbute, "Estudo do Comportamento em Flexão de Vigas Compósitas Sandwich," Mestrado em Engenharia Aeroespacial, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.
- [10] (2013, Consultado em 21/05/2013). *Aluminum Honeycomb Cores*. Available: <http://www.plascore.com/honeycomb-cores-aluminum.php>
- [11] L. Gil, "A cortiça como material de construção - Manual Técnico."
- [12] S. P. Silva, M. A. Sabino, E. M. Fernandes, V. M. Correlo, L. F. Boesel, and R. L. Reis, "Cork: properties, capabilities and applications," *International Materials Reviews*, vol. 50, 2005.
- [13] A.-A. P. d. Cortiça. (2013, Consultado em 21/05/2013). *Processo- do Montado à Garrafa*. Available: <http://www.apcor.pt/artigo/cortica-do-montado-a-garrafa.htm>
- [14] M. A. Fortes, M. E. Rosa, and H. Pereira, *A Cortiça*: IST Press, 2004.
- [15] A. Mestre, M. d. G. Campelo, M. Silva, and R. Velhinho. (2006, Consultado em 02/06/2013). *Dossier Info Cortiça - Sector e Materiais de Cortiça*. Available: http://www.amorim.com/xms/files/CorticeiraAmorim/Noticias/Susdesign_DossierInfoCortica.pdf
- [16] M. P. Santos, "Aplicação Estrutural de Cortiça para Melhoria da Segurança Passiva em Caso de Impacto," Mestrado, Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.
- [17] M. E. Rosa and M. A. Fortes, "Deformation and fracture of cork in tension," *Journal of Materials Science*, vol. 26, pp. 341-348, 1991.
- [18] B. Soares, L. Reis, and L. Sousa, "Cork composites and their role in sustainable development," *Procedia Engineering*, vol. 10, pp. 3214-3219, 2011.

- [19] C. A. C. C. Rebelo. (1989) Avaliação da Tenacidade à Fratura Interlaminar de Materiais Compósitos. *SPM - Sociedade Portuguesa de Materiais*.
- [20] G. F. Dias, "Definição de uma lei coesiva para juntas coladas de carbono-epóxico sob solicitações de modo I," Mestrado Integrado, Departamneto de Engenharia Mecânica, Universidade do Porto, Porto, 2012.
- [21] A. Costa, H. Pereira, A. Oliveira, and S. Elsevier, "Variability of radial growth in cork oak adult trees under cork production," *Forest ecology and management*, vol. 175, pp. 239-246, 2003.
- [22] O. Anjos, H. Pereira, and M. E. Rosa, "Tensile properties of cork in the tangential direction: Variation with quality, porosity, density and radial position in the cork plank," *Materials & Design*, vol. 31, pp. 2085-2090, 2010.
- [23] O. Castro, J. M. Silva, T. Devezas, A. Silva, and L. Gil, "Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures," *Materials & Design*, vol. 31, pp. 425-432, 2010.
- [24] E. M. Fernandes, V. M. Correlo, J. A. M. Chagas, J. F. Mano, and R. L. Reis, "Properties of new cork–polymer composites: Advantages and drawbacks as compared with commercially available fibreboard materials," *Composite Structures*, vol. 93, pp. 3120-3129, 2011.
- [25] A. B. de Moraes, M. F. de Moura, A. T. Marques, and P. T. Castro, "Mode-I interlaminar fracture of carbon/epoxy cross-ply composites," *Composite Science and Technology*, pp. 679-686, 2001.
- [26] M. F. S. F. de Moura, R. D. S. G. Campilho, and J. P. M. Gonçalves, "Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints," *International Journal of Solids and Structures*, pp. 1589-1595, 2009.
- [27] M. F. S. F. de Moura, R. D. S. G. Campilho, and J. P. M. Gonçalves, "Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading," *Composite Science and Technology*, pp. 2224-2230, 2008.

- [28] F. G. A. d. Silva, "Estudo numérico e experimental da fractura em modo I e em modo II de ligações coladas em madeira," Mestrado, Engenharia Mecânica, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2011.
- [29] R. M. d. R. P. Fernandes, "Definição de uma lei coesiva para juntas coladas em Carbono-Epóxico solicitadas em Modo II," Mestrado Integrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Porto, Porto, 2012.
- [30] "Resistência dos Materiais - Apostila 1," ed.
- [31] A. C. Composites. *CoreCork - technical data*. Available: <http://www.mcmc-uk.com/prod-data-sheet/cork/mds-gama-corecork.pdf>
- [32] L. A. Carlsson, J. W. Gillespie, and R. B. Pipes, "On the analysis and design of the end notched flexure (ENF) specimen for mode II testing," *Journal of Composite Materials*, pp. 549-604, 1986.
- [33] N. Dourado, M. F. S. F. de Moura, A. B. de Moraes, and A. B. Pereira, "Bilinear approximations to the mode II delamination cohesive law using an inverse method," *Mechanics of Materials - Elsevier*, vol. 49, pp. 42-50, 2012.
- [34] M. F. S. F. de Moura, M. A. L. Silva, A. B. de Moraes, and J. J. L. Moraes, "Equivalent crack based mode II fracture characterization of wood," *Engineering Fracture Mechanics (Elsevier)*, vol. 73, pp. 978-993, 2006.

10 ANEXO

Anexo

A equação (17) pode ser expressa como,

$$\alpha a_{eq}^3 + \beta a_{eq} + \gamma = 0$$

Usando o software MATLAB e considerando apenas a parte real da solução, obtêm-se,

$$a_{eq} = \frac{1}{6\alpha} T - \frac{2\beta}{T}$$

sendo

$$T = \left[\left(-108\gamma + 12\sqrt{3\left(\frac{4\beta^2 + 27\gamma^2\alpha}{\alpha}\right)} \right) \alpha^2 \right]^{\frac{1}{3}}$$